

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Návrh a simulace kvazi-distribuovaného senzoru teploty
založeného na Braggovských mřížkách využívajícího časový
multiplex v prostředí OptiSystem**

**Design and simulation of quasi-distributed temperature
sensor based on Bragg's gratings and using time-division
multiplexing in OptiSystem environment**

2015

Bc. Jan Škráček

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Škráček**

Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601T013 Telekomunikační technika

Téma: **Návrh a simulace kvazi-distribuovaného senzoru teploty založeného na Braggovských mřížkách využívajícího časový multiplex v prostředí OptiSystem**
Design and Simulation of Quasi-Distributed Temperature Sensor Based on Bragg's Gratings Using Time-Division Multiplexing in OptiSystem Environment

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je navrhnout a na simulacích ověřit vlastnosti kvazi-distribuovaného systému pro měření teploty pomocí Braggovských optovláknových mřížek.

1. Popis senzoru teploty využívajícího Braggovské mřížky.
2. Návrh časového multiplexu pro kvazi-distribuovaný senzor.
3. Simulace kvazi-distribuovaného senzoru teploty v systému OptiWave.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky z hlediska citlivosti a teplotního rozsahu navrženého systému.

Seznam doporučené odborné literatury:

OTHONOS, Andreas a Kyriacos KALLI. Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing. Artech House, 1999. ISBN 978-0890063446
YIN, Shizhuo, Paul B. RUFFIN a Francis T.S. YU. Fiber Optic Sensors, Second Edition. 2. vyd. CRC Press, 2008. ISBN 978-1420053654

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Skapa, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 5. května 2015

.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Janu Skapovi, Ph.D., za odborné vedení a podnětné návrhy k práci. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Marcelu Fajkusovi za odbornou pomoc, konzultaci a trpělivost při vytváření této diplomové práce. Na závěr bych rád také poděkoval mé rodině, která mě podporovala v průběhu studia.

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem a simulací kvazi-distribuo­vaného senzoru teploty v programu Optisystem. První kapitola je věnována vysvětlení pojmu optický senzor, jeho dělení do skupin dle typu použití. Dále výrobou optického senzoru. V druhé kapitole jsou podrobně popsány Braggovské mřížky, jejich parametry, způsob použití a výrobní technologie. Další kapitola popisuje vyšetřovací techniky pro převod posunu vlnové délky vlivem změny teploty nebo deformace na jinou snadněji měřitelnou veličinu, jako je amplituda, fáze nebo frekvence. Poslední teoretická kapitola je věnována multiplexním metodám pro možnost řazení více Braggovských senzorů za sebou na jednom vlákne.

Pátá kapitola ukazuje, jakým způsobem byl navrhnut senzor teploty v programu Optisystem, jaký má měřicí rozsah, přesnost a citlivost. Šestá kapitola řeší, jak na jednom vlákne pomocí časového multiplexu aplikovat desítky senzorů a měřit tak teplotu ve více bodech na trase, kde je optické vlákno aplikováno.

Klíčová slova

Braggovská mřížka; senzor teploty; časový multiplex; optický vláknový senzor; kvazi-distribuo­vaný senzor teploty; Optisystem

Abstract

This thesis describes the design and simulation of quasi-distributed temperature sensor in the program OptiSystem. The first chapter explains the concept of an optical sensor, its division into groups by type of use. Furthermore, the production of optical sensor. In the second chapter describes Bragg grating, parameters, method of use and production technology. The next section describes interrogation techniques for converting wavelength shift due to temperature change or strain to another more easily measurable variable, such as amplitude, phase or frequency. The last theoretical chapter is devoted to multiplexed methods for the possibility of more inscription behind Bragg sensors in a row on one fiber.

The fifth chapter shows how the temperature sensor was designed in OptiSystem program, which has a measuring range, accuracy and sensitivity. The sixth section a solution how one fiber applied using time multiplex dozens of sensors and thus measure the temperature at multiple points along the route, where the optical fiber is applied.

Key words

Bragg grating; temperature sensor; time division multiplex; optical fiber sensor; quasi-distributed temperature sensor; OptiSystem

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
c	m/s	Rychlost světla
dB		Decibel
f	Hz	Frekvence
k		Interferenční viditelnost
L, L_i	m	Délka vlákna
n_c, n, n_{co}		Index lomu jádra
n_{cl}		Index lomu pláště
n_{eff}		Efektivní index lomu
N		Řád mřížky, číslo kanálu
P_e		Napět'ově-optický koeficient
$p_{11,22}$		Deformačně optické složky
P	W	Výkon
R_s	bit/s	Vzorkovací frekvence
U	V	Napětí
λ	nm	Vlnová délka
λ_B	nm	Braggovská vlnová délka
$\Delta\lambda_B$	nm	Posun Braggovské vlnové délky
ΔT	°C	Teplotní změna
T_i	s	Doba zpoždění
Θ	°	Úhel paprsku svíraný s kolmicí
\emptyset	m	Průměr
ε	$\mu strain$	Deformace
α	K^{-1}	Koeficient teplotní roztažnosti
δ_n		Změna indexu lomu
ζ		Teplotně-optický koeficient
T	s	Délka periody
t, T_w	s	Šířka pulzu

Λ	Perioda FBG mřížky
ν	Poissonův koeficient
z	Směr šíření světla

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
AOTF	Acousto-optic tunable filter
ASE	Amplified spontaneous emission
BPF	Band pass filter
CCD	Charge Coupled Device
CDM	Code division multiplexing
EFPI	Extrinsic Fabry-Perot interferometric
ELED	Endangled light-emitting diode
FBG	Fiber Bragg grating
FWHM	Full width at half maximum
FDM	Frequency division multiplexing
OSA	Optical Spectrum Analyzers
SDM	Space division multiplexing
LPFG	Long period fiber grating
LED	Light-emitting diode
MZI	Mach-Zehnder interferometer
PZT	Piezoelectric transducer
SDM	Space division multiplexing
SOA	Semiconductor optical amplifiers
SLED	Super luminescent light-emitting diodes
TDM	Time division multiplexing
TDMA	Time division multiple access
UV	Ultraviolet
VCO	Voltage controlled oscillator
WDM	Wavelength division multiplexing

Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Optické senzory.....	- 2 -
1.1 Kvazi - distribuovaný senzor.....	- 2 -
1.2 Intrinzitní senzory	- 3 -
1.3 Extrinžitní senzory	- 3 -
1.4 Technologie optických vláken a senzorů	- 3 -
2 Braggovské mřížky	- 6 -
2.1 Teoretický popis FBG	- 6 -
2.2 Parametry FBG.....	- 8 -
2.2.1 Braggovská centrální vlnová délka a šířka spektra	- 8 -
2.2.2 Odrazivost	- 9 -
2.3 Výrobní technologie FBG	- 10 -
2.3.1 Interferometrická metoda	- 10 -
2.3.2 Neinterferometrická metoda.....	- 12 -
3 Popis senzoru teploty a deformace.....	- 14 -
3.1 Vyšetřovací techniky.....	- 16 -
3.1.1 Převod vlnové délky na amplitudu	- 16 -
3.1.2 Převod vlnové délky na frekvenci	- 17 -
3.1.3 Převod vlnové délky na fázi	- 18 -
3.1.4 Převod vlnové délky na umístění	- 19 -
4 Multiplexní metody	- 20 -
4.1 Časový multiplex (TDM)	- 20 -
4.1.1 Sít' senzorů závislých na intenzitě.....	- 21 -
4.2 Multiplexování FGB senzorů	- 21 -
4.2.1 Princip TDM Braggovského senzoru pro sledování zdravotního stavu ..	- 23 -
4.2.2 Kombinace TDM a interferometrické detekce	- 25 -
4.3 Vlnový multiplex (WDM).....	- 26 -
4.3.1 WDM/TDM.....	- 28 -
5 Návrh kvazi-distribuovaného FBG senzoru	- 29 -

5.1	Návrh FBG senzoru.....	- 30 -
5.1.1	Důvod vytvoření subsystému	- 30 -
5.1.2	Subsystém.....	- 31 -
5.1.3	Schéma zapojení senzoru	- 33 -
5.1.4	Princip vyhodnocení měřené teploty	- 34 -
5.2	Měření teploty pomocí FBG senzoru v Optisystemu	- 36 -
5.2.1	Vliv FWHM a odrazivosti na odražené výkonové spektrum	- 37 -
5.3	Návrh převodní charakteristiky	- 40 -
5.3.1	Kalibrace senzoru (rozsah -20°C až 200°C).....	- 41 -
5.3.2	Kalibrace senzoru (rozsah 40°C až 100°C)	- 43 -
6	Návrh TDM části pro identifikaci FBG senzorů	- 44 -
6.1	Schéma zapojení a nastavení parametrů.....	- 44 -
6.2	Identifikace FBG senzoru s využitím časového multiplexu.....	- 46 -
	Závěr	- 50 -
	Použitá literatura	- 52 -
	Seznam příloh.....	- 54 -

Úvod

Vláknové senzory v posledních letech přitáhly značnou pozornost. Časem se senzory vyvinuly z měření jednobodového do mnohabodového kvazi-distribuo­vaného měření a plně distribuovaného měření. Kvazi-distribuo­vané optické snímání vláknem se provádí výsledkem řady bodových snímačů podél vlákna. Ve srovnání s plně distribuovaným snímáním optickým vláknem, má kvazi-distribuo­vané snímání mnohem vyšší prostorové rozlišení a poměr signálu k šumu. Díky tomu může poskytovat vyšší přesnost měření v mnoha průmyslových aplikacích, včetně mostů, železnic, tunelů, velkých budov, ropy a plynovodů.

Jsou zaznamenány různé kvazi-distribuo­vané technologie snímání optickým vláknem. Mezi nejoblíbenější systém vzhledem ke své citlivosti, malému rozměru, širokému dynamickému rozsahu a dobré spolehlivosti pro měření veličin, jako je teplota, tlak, deformace, patří Braggovské mřížky. Nejdůležitějším výkonovým parametrem pro měření pole senzorů pomocí FBG je schopnost multiplexování.

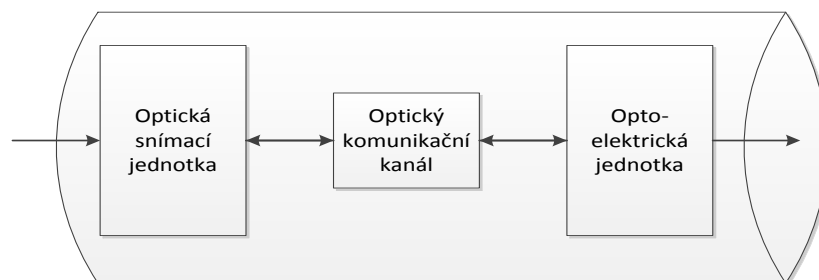
V teoretické části popíšu základní dělení vláknových senzorů. Vlastnosti, popis parametrů, výrobní postupy a princip funkčnosti Braggovských mřížek. Bude také popsán způsob vyhodnocování teploty a deformace pomocí senzorů využívajících Braggovskou mřížku. Vysvětlím také způsob, jakým se změnou teploty a deformace určuje posun vlnové délky. Zmíním se o citlivosti senzoru na tyto veličiny a dalších požadavcích potřebných k návrhu senzoru. Závěrem teoretické části bude přehled multiplexních metod s podrobnějším popisem těch nejpoužívanějších u FBG mřížek. Vysvětlím převážně časové multiplexování, kterým identifikuji jednotlivé mřížky v praktické části diplomové práce.

V praktické části nejprve samotný senzor založený na Braggovských mřížkách navrhnu. Mým úkolem je tento senzor teploty navrhnout v prostředí programu Optisystem. Pro jeho navržení bude třeba zjistit ideální nastavení hlavních parametrů Braggovských mřížek. Poté nasimulovat jak se se zvyšující/klesající teplotou mění odražený výkon. Z těchto výsledků získám závislost odraženého výkonu na teplotě a budu schopen pomocí matematického výpočtu detekovat teplotu na jednotlivých senzorech tvořených subsystémem složených z Braggovských mřížek. Výslednými parametry, které určím, bude citlivost, přesnost a vhodný měřicí rozsah senzoru.

1 Optické senzory

V poslední době se oblast optiky a především optických vláken velmi rychle rozvíjí a to převážně v oblasti telekomunikací. První náznaky o vývoji a použití nízko útlumových optických vláken se datuje do šedesátých let 20. století. Postupně, jak se tato technologie vyvíjela a zdokonalovala, začala se v posledních letech používat optická vlákna také pro výrobu senzorů z optických vláken v mnoha aplikacích pro každodenní potřeby, jak je uvedeno v tab. 1.1.

Optický senzor se skládá ze tří nejdůležitějších částí (obr. 1.1) a to ze snímacího zařízení, komunikačního kanálu a subsystému generujícího nebo detekujícího signál.



Obrázek 1.1: *Blokové schéma optického senzoru*

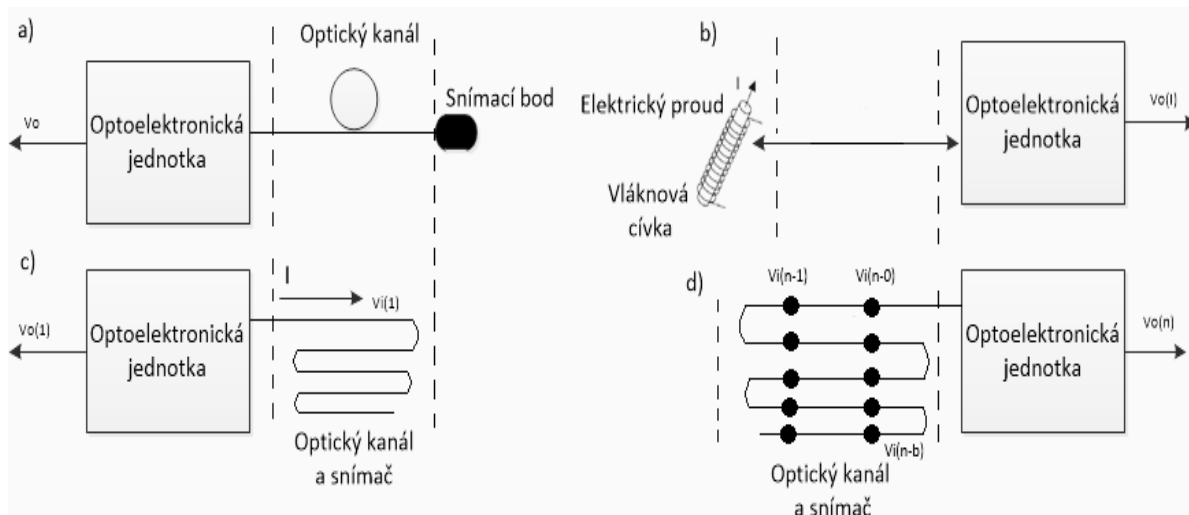
Rozdělení optických senzorů je možné hned z několika hledisek. Těmi zásadními jsou např. obor použití, měřená veličina, prostorové rozložení měřené veličiny, modulace měřené veličiny, výrobní technologie a další.

Rozdělení dle prostorového rozložení měřené veličiny (obr. 1.2):

- a) bodový senzor,
- b) integrovaný senzor,
- c) distribuovaný senzor,
- d) kvazi-distribuovaný senzor.

1.1 Kvazi - distribuovaný senzor

Převážně se používá pro měření teploty. Informace o měřené veličině je získána z předem definovaných bodů podél délky vlákna. Pro použití se využívají speciální vlákna citlivá na určitou látku nebo se do optické smyčky vkládá speciální materiál, tak aby bylo možné snímat měřenou veličinu. Podrobněji se budu tomuto typu senzoru věnovat v kapitole 6. [5]



Obrázek 1.2: Snímání a) bodové, b) integrované, c) distribuované, d) kvazi - distribuované

1.2 Intrinzitní senzory

U těchto senzorů probíhá modulace světla přímo v optickém vlákně. Jejich výhodou je snadné použití, protože nevyžadují speciální péči. Největší výhodou je schopnost těchto senzorů multiplexovat mřížky o různých periodách v jednom vlákně. Pomocí spojitě laditelného laserového zdroje je možné distribuované snímání tisíců Braggovských mřížek. Zástupcem této skupiny senzorů je intrinzitní Fabry-Pérotův interferometr, měřící mezeru mezi po sobě jdoucími mřížkami. [5] Tento typ senzoru lze využít k měření teploty, odrazu, mikroohybu a dalších vlivů ovlivňujících optické vlákno.

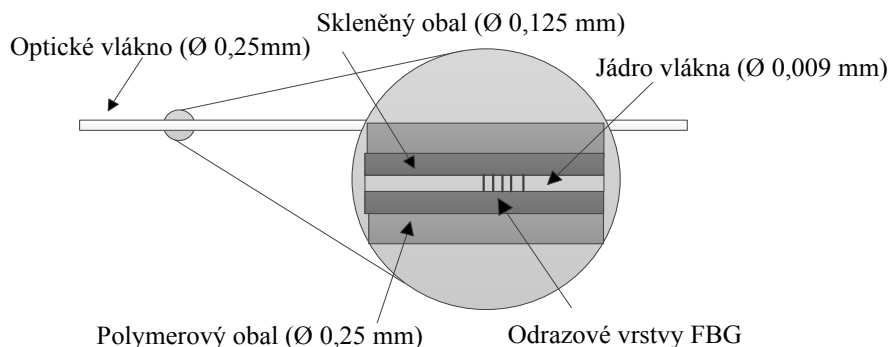
1.3 Extrinzitní senzory

Jde o senzory, kde je optické vlákno použito k vazbě světla. Samotné měření veličiny se uskutečňuje mimo optické vlákno. Nejčastěji do nebo z části, ve které je světelný paprsek ovlivněn měřenou veličinou. Tento externí proces může být zachycen do vlákna několika způsoby, např. pomocí svaření spojů, lepením nebo mechanickým spojením. [5]

Obecně se vláknové mřížky dělí na mřížky s krátkou periodou označované jako Braggovské mřížky, jejichž perioda je do $1\mu\text{m}$ a mřížky s dlouhou periodou $100 - 500\mu\text{m}$.

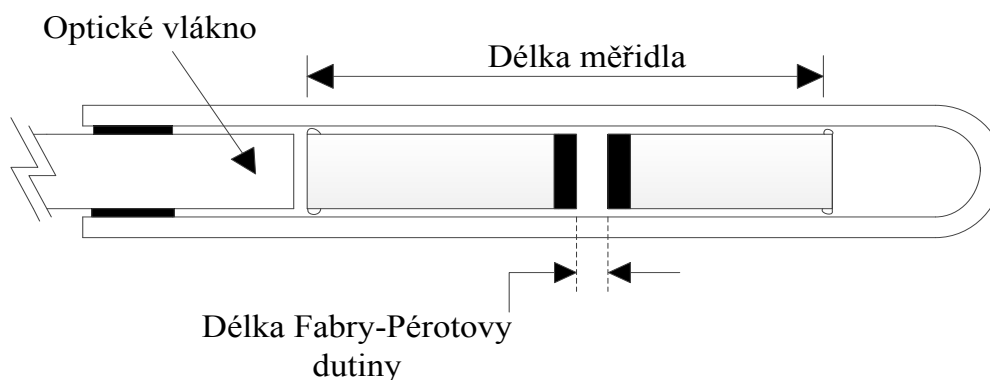
1.4 Technologie optických vláken a senzorů

Optická vlákna jsou lehká, malá a ohebná. Průměr takových vláken v mnoho vidovém provedení se pohybuje kolem $62,5/125\mu\text{m}$, kde dle normy ISO 11801 OM1 je $62,5\mu\text{m}$ průměr jádra a $125\mu\text{m}$ průměr pláště. U senzorů využíváme spíše jedno vidová vlákna s průměrem jádra kolem $9\mu\text{m}$ a méně. Před vlhkostí a mechanickým vlivem okolí je vlákno chráněno polymerovým obalem nebo hermeticky uzavřeným obalem z keramiky či kovu. Pro obalení optických vláken a senzorů je nejpoužívanějším materiálem polyamid, který má vynikající tepelné vlastnosti a dobře se váže s různými lepidly.

Obrázek 1.3: *Průřez vláknem s Braggovskou mřížkou*

Jedním z hlavních nedostatků v řešeních se zapuštěnými optickými senzory je pevnost těchto vláken. Výrazným elementem této vady je vlhkost, která snižuje životnost vláken. Nicméně je dokázáno, že deformační selhání je často menší než 1 %. Velký vliv na tom nese proces výroby Braggovské mřížky, protože se při něm zasahuje přímo do nechráněného vlákna, které je velmi křehké bez krycí vrstvy. V minulosti se odstraňovala krycí vrstva mechanicky nebo chemickým procesem. Tyto vlákna jsou pak více náchylná na proces stárnutí a snížení pevnosti. Proto jsou dnes mřížky zapisovány do vlákna přímo při výrobě, kdy je vlákno minimálně ovlivněno mechanickým vlivem a roste tak jeho pevnost. Metody výroby FBG mřížek jsou podrobněji vysvětleny v kapitole 2.3.

Pro snímání teploty a deformace jsou nejčastěji využívány dva druhy snímačů. Jedná se o interferometrické Fabry-Pérotovy senzory a Braggovské mřížky. Pro jejich všestrannost a multiplexní přenos jsou hojně využívány v mnoha aplikacích. Více o Braggovských mřížkách je popsáno v kapitole 2.

Obrázek 1.4: *Průřez Fabry-Pérotovy dutiny*

Interferometrický Fabry-Pérotův senzor je zobrazen na obr. 1.4. Je složen ze dvou odražejících zrcadel, které vytvářejí Fabry-Pérotovu dutinu. Princip senzoru je založen na skládání dvou odrazů a následné změny intenzity v detektoru vlivem měnící se vzdálenosti

těchto dvou zrcadel. Délku přímo ovlivňuje teplota a deformace. Jako zrcadlo je použit povlak odrazivého materiálu uvnitř vlákna nebo přímé rozštěpení konců vláken.

Dutina v extrinzičních Fabry-Pérotových interferometrech (EFPI) způsobuje mechanické oslabení. U těchto senzorů je velkou nevýhodou, že se u nich projevuje koncentrace napětí. Způsobené velikosti nespojitosti mezi vedoucím vláknem, vodící trubicí a částečným odrazovým spojem, způsobují deformační selhání okolo 1% a méně. Naopak senzory s Braggovskými mřížkami jsou více podobné samotným optickým vláknům a mají tak daleko větší pevnost. [8]

Tabulka 1.1: *Shrnutí aplikací vyráběných typů mřížkových senzorů*

Typ mřížkování	Aplikace
<i>Mřížky s krátkou periodou</i>	Senzory tlakové
	Senzory zrychlení
	Senzory pnutí a teplotní
	Senzory ultrazvukové
	Senzory mechanického zatížení
	Senzory elektromagnetických polí
	Senzory detekce plynů
	Průtahoměry
	Odrazné prvky v interferometrických senzorových polích
<i>Laserové senzory s Braggovskou mřížkou</i>	Hydrofony
	Akustické emisní senzory pro nedestruktivní měření
<i>Mřížky s dlouhou periodou</i>	Senzory chemické
	Senzory ohybové
	Širokopásmové filtry
<i>Mřížky s P_i - fázovým posuvem</i>	Senzory příčného zatížení
<i>Rozmítané mřížky</i>	Senzory pnutí
	Demodulátory

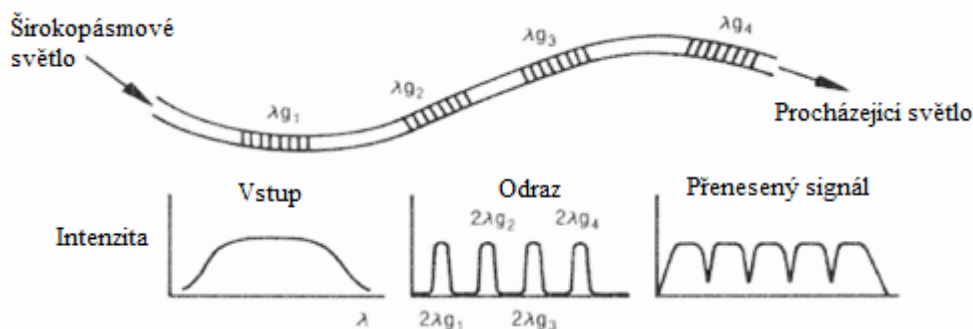
2 Braggovské mřížky

Jedná se o nejrozšířenější použitou strukturu uvnitř optických vláken pro senzorové účely. Vláknem s optickým mřížkováním lze definovat jako: „Optické vlákno s periodicky se opakujícím narušením indexu lomu v jádře, které rozkládá optický signál v základním vedeném vidu o specifické vlnové délce na jiné jádrové, plášťové či vyzařované vidy.“ [5]

Na tato vlákna je kladena spousta technických požadavků, jsou to zejména vysoká citlivost, velký dynamický rozsah a rozlišení, schopnost WDM a TDM, vlnově zakódovaná odezva, přenosová a odrazová filtrace, robustnost, odolnost a stabilita po dlouhou dobu, snadná výroba, odolnost proti elektromagnetickému rušení a další. [4]

Braggovská mřížka lze použít pro měření teploty nebo deformace. Změny v axiálním směru v důsledku deformace nebo tepelné roztažnosti změny indexu lomu, který moduluje odražený signál. Typické vlákno s Braggovskou mřížkou může poskytnout prakticky až 100% odrazivost s šířkou odraženého spektra $< 0,5$ nm. Délka mřížky se pohybuje v rozmezí od desetin až po stovky mikrometrů. Délka mřížky má vliv na počet maxim a minim, které lze odvodit, jestliže známe vlnovou délku, na které bude mřížka používána. Nejčastěji se u senzorů jedná o vlnové délky v rozmezí 1510 až 1590 nm, ale existují i senzory používané v pásmu 850 nm. [4]

Pro kvazi-distribuívaný systém v kombinaci s časovým multiplexem platí, čím nižší má odrazivost, tím větší počet senzorů lze aplikovat. Na obr. 2.1 je zobrazen kvazi – distribuívaný snímací systém Braggovských mřížek. Odražený nebo přenesený signál identifikuje změnu polohy odražených vrcholů a umožňují měření lokalizovaného napětí. [1]



Obrázek 2.1: Kvazi-distribuívaný systém Braggovské mřížky

2.1 Teoretický popis FBG

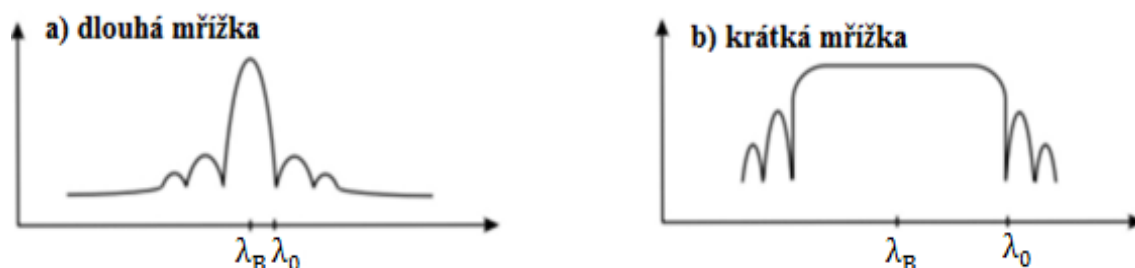
Braggovská mřížka je tvořena krátkým úsekem jednomódového optického vlákna, ve kterém je periodicky měněn index lomu uvnitř jádra optického vlákna. Na obr. 2.4 je k vidění konstrukce FBG s vyznačením spekter vstupních a výstupních signálů. Úzko spektrální světlo, které vzniká při odrazu světla podél vlákna v největší intenzitě, se nazývá Braggovská rezonanční vlnová délka. Tato Braggovská vlnová délka se značí λ_B a je určena vztahem 2.1.

Konstrukce FBG umožňuje dopředně vedené módy odrážet a spojovat s odraženými módy. [1][7]

$$\lambda_B = \frac{2n_{eff}\Lambda}{N} , \quad (2.1)$$

kde n_{eff} je efektivní vidový index, Λ je prostorová perioda mřížky a N číslo vyjadřující řád mřížky.

Řád mřížky závisí na typu použité mřížky. Jsou dva typy mřížek viz. obr. 2.2. První skupinou jsou Braggovské mřížky, jejichž $N = 1$, jejich perioda odpovídá polovině λ_B . V praxi má perioda délku kolem 1 μm . Druhá skupina mřížek nazývaná vláknové mřížky s dlouhou periodou (LPFG) má délku mřížky v rozmezí desítek až stovek μm . Tyto mřížky využívají vyšších řádů period $N = 2, 3, 4$ atd. Šířka hlavního maxima v odraženém spektru světelného pulzu je tím větší, čím menší je efektivní délka mřížky. Nejuzší spektrum hlavního maxima lze získat v mřížce s dlouhou geometrickou délkou a malou hodnotou δn . [6] [7]

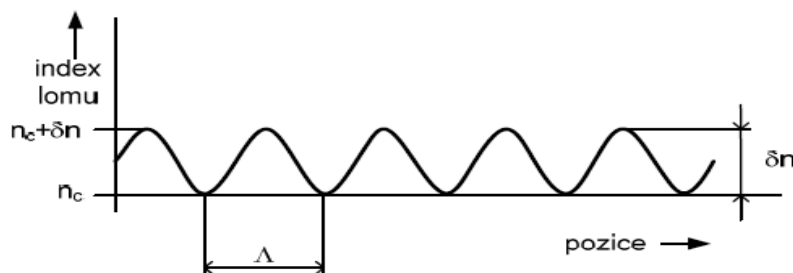


Obrázek 2.2: Odražené spektrum mřížky a) s dlouhou periodou, b) s krátkou periodou

Vzorec 2.2 matematicky popisuje modulaci indexu lomu zobrazené na obr. 2.3.

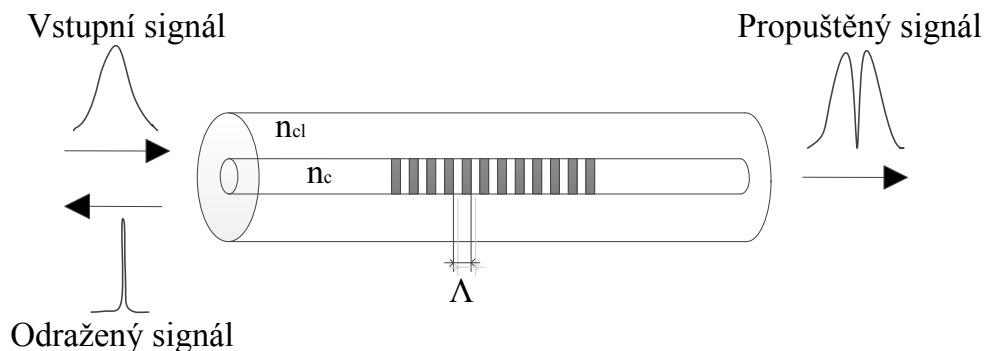
$$n(z) = n_c + \delta n [1 + \cos(2\pi z / \Lambda)] , \quad (2.2)$$

kde n_c je index lomu neexponovaného jádra, δn je změna indexu lomu. Symbol z značí pozici ve směru šíření světla mřížkou a Λ je perioda mřížky. [1] [6] [7]



Obrázek 2.3: Průběh indexu lomu homogenní vláknové mřížky

Vlnová délka odražená od mřížky, je nosičem informace o měřené veličině a je nezávislá na intenzitě kolísání světla. Braggovská vlnová délka je závislá na změně indexu lomu vlákna n_{eff} a periodě Λ . Vláknová mřížka lze tedy označit za intrinziční vláknový senzor, který mění spektrum odraženého záření. [1] [5]



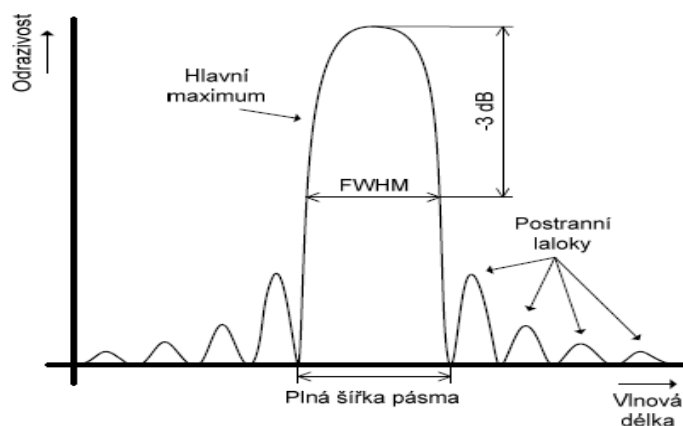
Obrázek 2.4: Princip Braggovské vláknové mřížky

2.2 Parametry FBG

Hlavními třemi výstupními vlastnostmi mřížek je pozice hlavního maxima, nebo-li Braggovská vlnová délka, šířka hlavního maxima a odstup signálu od šumu, tedy odstup hlavního maxima od postranních laloků. Další z vlastností, která lze pozorovat může být tvar hlavního maxima, zdali je spíše ploché nebo ostré. Tyto dominantní vlastnosti (parametry) jsou graficky znázorněny na obr. 2.5, kde spektrum odrazivosti mřížky vzdáleně připomíná funkci sinc. Těmito parametry se budu více zabývat v praktické části této práce. Budou tam ukázány různé možnosti nastavení parametrů a jejich vliv na odražené spektrum signálu FBG mřížky.

2.2.1 Braggovská centrální vlnová délka a šířka spektra

Braggovská centrální vlnová délka je především charakterizována periodou mřížky a částečně změnou n_{eff} . Střed hlavního maxima představuje Braggovskou rezonanční vlnovou délku λ_B . Plná šířka odraženého spektra je měřena mezi minimy na okraji hlavního maxima. Častěji se můžeme setkat s označením FWHM značící šířku spektra při poklesu odraženého výkonu o 50 % (-3dB). Průběh křivky odrazivosti FBG mřížky, v závislosti na vlnové délce je také patrný z obr. 2.5, kde můžeme pozorovat kromě hlavního maxima (λ_B) i postranní laloky, které představují hladinu šumu v odraženém signálu s odstupem intenzity 30 až 50 dB. [6] [2]



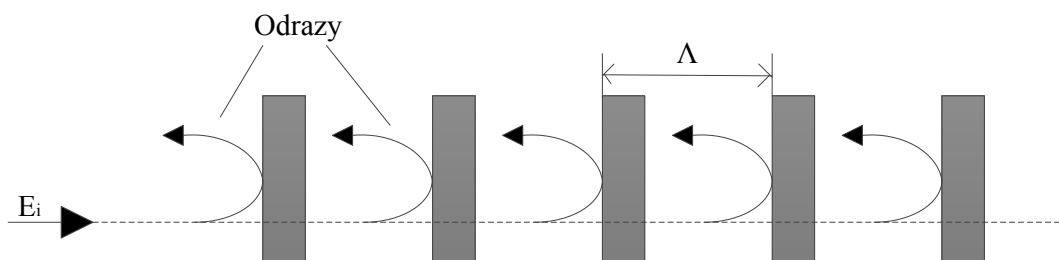
Obrázek 2.5: Amplitudová spektrální charakteristika mřížky

2.2.2 Odrazivost

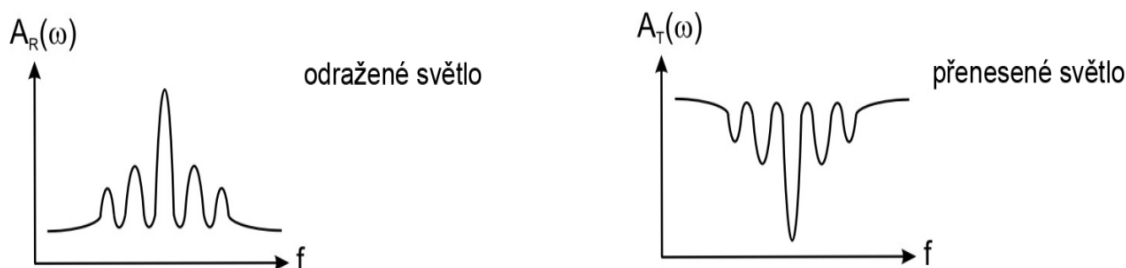
Zvýšení odrazivosti dosáhneme zvýšením délky mřížky, ale jen dokud délka není rovna efektivní délce mřížky. Při této délce dojde k největšímu možnému odrazu a největší rezonanci signálu v mřížce. Větší prodlužování mřížky nemá vliv na odrazivost mřížky ani na další její parametry, jen na náklady spojené s výrobou.

Z toho vyplývají dvě možné řešení jak získat potřebnou odrazivost mřížky a to použitím kratší mřížky s větší změnou indexu lomu δ_n nebo delší mřížky s menším δ_n . První řešení bude mít za následek vznik podstatně méně selektivní mřížky, tedy současným zvětšováním délky mřížky a snižováním δ_n lze dosáhnout vyšší selektivity a naopak.[6]

Na obr. 2.6 je znázorněno, jak vznikají odrazy od FBG mřížek na určitých vlnových délkách. Spektrum signálu odraženého a přeneseného po průchodu přes Braggovskou mřížku je ukázán na obr. 2.7.

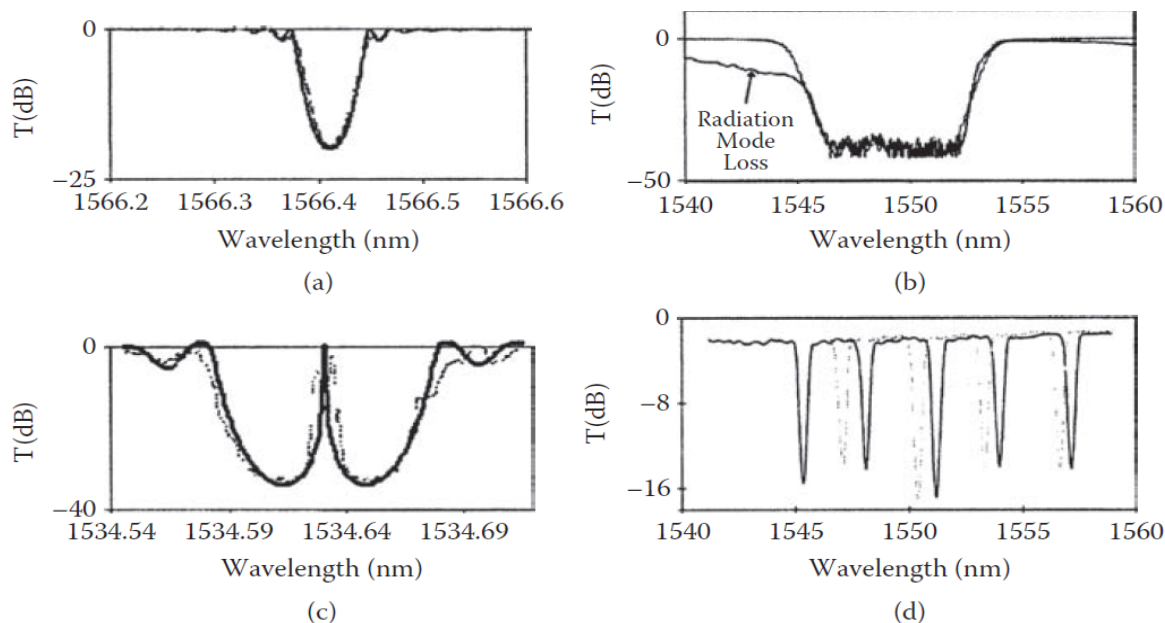


Obrázek 2.6: Odrazy od Braggovských mřížek



Obrázek 2.7: Odražené a přenesené spektrum FBG

Obrázek 2.8 zobrazuje typická spektra propustnosti uniformní, chirpované, fázově posunuté mřížky a řady mřížek za sebou. Jejich životnost lze očekávat asi 25 let na komerčních FBG zařízeních. Během této doby může dojít k poklesu odrazivosti o 1 až 2 %. [1]



Obrázek 2.8: *Odražené spektrum FBG a) uniformní mřížky, b) chirpované, c) fázově posunuté a d) několik mřížek, převzato z [1]*

2.3 Výrobní technologie FBG

Pro výrobu Braggovských mřížek je třeba ve vlákne změnit index lomu. Pomocí jevu nazývaného fotosenzitivita se ve vlákne vytvoří periodické narušení struktury. Změny indexu lomu je dosaženo vystavením jádra vhodně dotovaného fotocitlivého křemenného skla intenzivnímu UV záření. Mezi dvě nejpoužívanější techniky pro zapisování mřížek patří technika dvou paprskovou holografickou metodou a technika difrakční fázové masky. Obě techniky jsou znázorněny na obr. 2.9 a 2.10 a jde o interferometrické metody zápisu mřížky. Mřížky mohou být pomocí UV zapsány ve většině typů vláken, včetně standartních germanio-křemičitého telekomunikačního vlákna. Příměsi obsahující germanium v jádře vlákna vykazují největší fotocitlivost. [3][7]

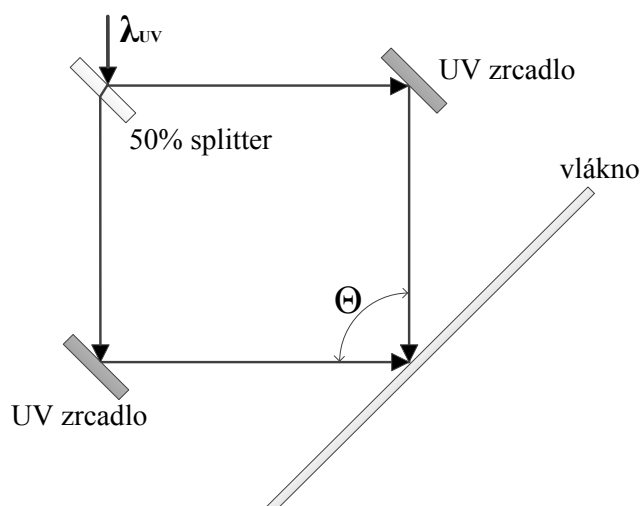
Fotosenzitivita byla pozorována už v roce 1978 v germaniem dopovaném křemičitém vlákne, kdy po dlouhém vystavení optické vlákna laserovému záření došlo ke zvýšení útlumu vlákna. Světlo vstupující do vlákna interferuje s Fresnelovým odraženým paprskem a v interferenčních maximech vytváří trvalou změnu indexu lomu optického vlákna. Změna indexu lomu působí jako odrazná plocha, která spojuje odražené a propuštěné paprsky. Tyto mřížky dosahovaly malých změn indexu lomů, proto je tato metoda nahrazena novou metodou, kdy je vlákno bočně ozařováno. Tato technika se jmenuje příčná holografická metoda. [3]

2.3.1 Interferometrická metoda

Metoda, při níž je vytvořen proužkový světelný vzor pomocí vzájemné interference dvou fokusovaných UV paprsků s vhodným úhlem dopadu na vlákno. Rozdělení paprsků a následné interference se nejčastěji dosahuje díky fázové masce nebo splitteru. Metoda musí

splňovat požadované prostorové a podélné optické vlastnosti jako jsou kvalita paprsku nebo koherentní parametry. Strukturu vznikající mřížky tvoří tento interferenční vzor.

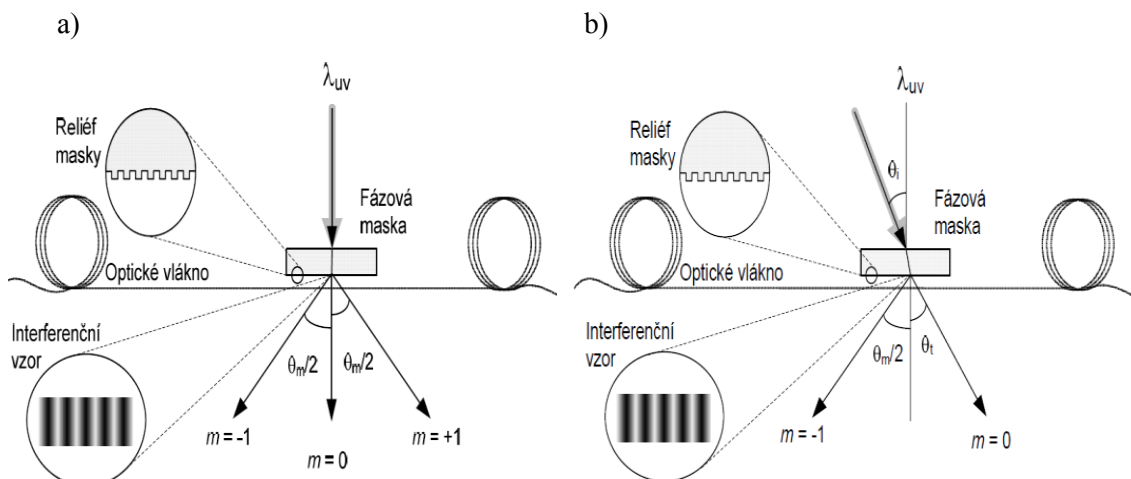
Interferenční metoda je založena na interferometru, který se používá v holografii. Princip je ukázán na obr. 2.9, svazek z UV laseru je rozdělen na dva pomocí splitteru a poté opět spojen pod společným úhlem, pomocí dvou zrcadel. Při osvitu je v místě protnutí svazků umístěno vlákno a vytvoří se na něm FBG mřížka. Výhoda této metody je, že Braggovská vlnová délka není závislá na vlnové délce dopadajícího UV záření. Jako nevýhoda se může jevit náročnost na přesnost a kvalitní zpracování všech dílů. [6] [2]



Obrázek 2.9: Technologie zhotovení FBG interferometrickou metodou

Metoda fázové masky

Použitím fázové masky jako části interferometru došlo k zjednodušení zápisu vláknových mřížek. Při výrobě mřížky touto metodou se ozařuje optické vlákno koherentním UV zářením. Propustná, průhledná destička z křemičitého skla má na svém povrchu vyleptaný mřížkový reliéf. Tento reliéf má přesně danou hloubku leptání a poměr pruh-mezera. Reliéf pak zajišťuje zpoždění záření mezi prohlubněmi a výstupky mřížky. Světlo, které vystupuje z tohoto reliéfu, interferuje a vytváří zóny s minimální a maximální intenzitou, ty jsou pak od sebe vzdálené polovinu periody mřížky na masce. Při kolmém dopadu UV záření na masku, je toto světlo rozděleno do tří difrakčních řádů viz. obr. 2.10. Naproti tomu při nekolmém dopadu světla na fázovou masku, nemusí být intenzity stejné. Avšak pro dosažení maximálního kontrastu interferenčního vzoru je nutná stejná intenzita obou svazků. K výrazně nižší efektivitě, při zapisování mřížek, dochází při snižování kontrastu. Metoda nevyžaduje extrémní mechanickou stabilitu, ani vysokou koherenci světla, poněvadž je celá mřížka exponována současně. Nevýhodou však je nutnost připravit individuální fázové masky pro odlišné Braggovské vlnové délky. Celková výroba masky je pak nákladná. [3] [6]



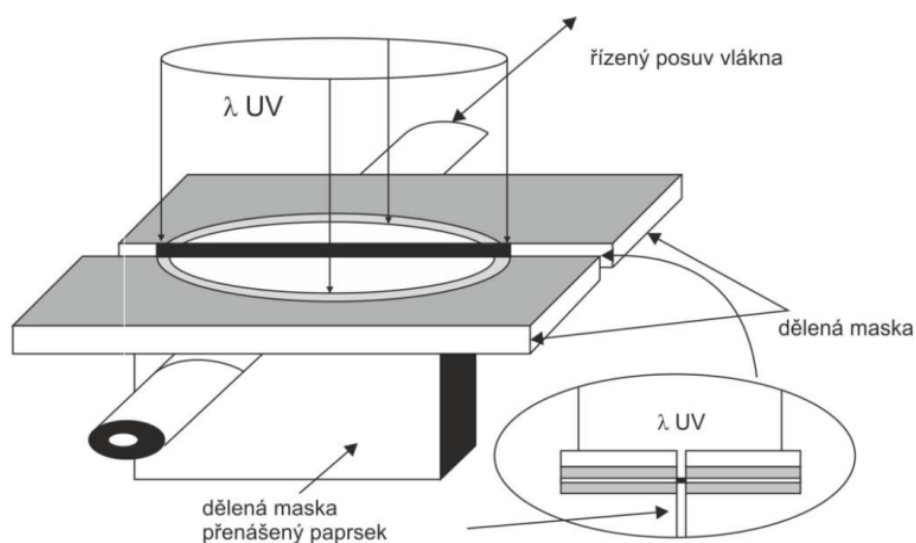
Obrázek 2.10: Technologie zhotovení FBG metodou difrakční fázové masky: a) pro kolmý dopad UV svazku, b) pro dopad UV pod úhlem θ_i

2.3.2 Neinterferometrická metoda

Dalším způsobem výroby mřížky je neinterferometrický. Jde o metodu bod po bodu, kdy boční osvit vlákna probíhá bodově a zároveň se posunuje vlákno o vzdálenost určující periodu mřížky. Vnější metody zápisu vyžadují velkou přesnost a stabilitu celého výrobního procesu, ale v dnešní době už jsou tyto předpoklady kontrolovány a jsou schopné sériové výroby. [1][6]

Metoda bod po bodu

Tato metoda je založena na použití velmi výkonného pulzního laseru. Jeho svazek se upraví pomocí soustavy čoček do velmi tenkého paprsku. Paprsek poté prochází štěrbinou, která jej zúží do požadované šířky. Vlákno se umísťuje na posuvný motorizovaný stolek pod štěrbinou a pohybuje se určitou rychlostí. Osvit vlákna trvá potřebnou dobu pro dosažení požadované změny v daném místě. Principem je tedy osvětlení vlákna bodově, přičemž se po každém osvětlení vlákno posune o určitou periodu. Takto se postupuje do té doby, než je vytvořena mřížka o požadované délce viz. obr. 2.11. Výhodou tohoto principu postupu je, že změnou rychlosti posuvu vlákna či změnou frekvence impulzů laseru můžeme jakkoli měnit periodu dané mřížky. Lze tedy vyrábět jak mřížky s dlouhou periodou tak i s proměnnou periodou tzv. čírpované mřížky. [6][7]



Obrázek 2.11: *Princip techniky bod po bodu*

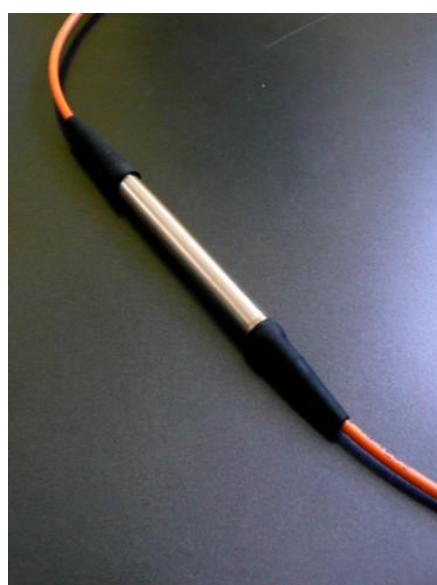
Reálná ukázka senzoru využívající Braggovskou mřížku od firmy Safibra je na obr. 2.12. Pro měření uvnitř konstrukce nebo na povrchu měřeného objektu. Jeho parametry jsou:

Délka senzoru: 100 mm

Teplotní rozsah: -20 °C až 60 °C

Rozlišení: +/- 0,1 °C

Přesnost: +/- 1 °C



Obrázek 2.12: *Teplotní senzor FBG, FC / APC konektory, z nerezové oceli [19]*

3 Popis senzoru teploty a deformace

Snímací funkce FBG vyplívá z citlivosti změny periody indexů lomů mřížky v závislosti na mechanické nebo tepelné odchylce. Deformace ovlivňuje odezvu na FBG přímo prostřednictvím expanze a komprese velikosti rozteče mřížky a pomocí napětovo-optického efektu. To značí napětově indukované změny indexu lomu. Teplotní citlivost FBG je způsobena zejména změnou indexu lomu a v menší míře koeficientem tepelné roztažnosti ve vlákne. To znamená, že maximální odraz vlnové délky se posune o $\Delta\lambda_B$ v závislosti na deformaci ϵ a změně teploty ΔT , jak je uvedeno vzorcem 3.1.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\epsilon + (\alpha + \zeta)\Delta T, \quad (3.1)$$

kde P_e je napětově-optický koeficient, ϵ je axiální deformace, α je koeficient teplotní roztažnosti materiálu vlákna, ζ je teplotně-optický koeficient a ΔT je teplotní změna. Normalizovaná napětová závislost při konstantní teplotě je dána rovnicí 3.2.

$$\frac{1}{\lambda_B} \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta\epsilon} = 0,78 * 10^{-6} \text{micro-strain}^{-1} \quad (3.2)$$

a normalizovaná teplotní responsivita při konstantní deformaci je popsána vzorcem 3.3.

$$\frac{1}{\lambda_B} \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 6,678 * 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad (3.3)$$

Obrázky 3.1 a 3.2 ukazují typickou závislost deformace a teploty na vlnové délce, prokazující lineární charakteristiku. [1] [4]

Snímání teploty

Když je FBG vystavena změně teploty, roztahuje se nebo zkracuje, což mění rozestup mezi jednotlivými mřížkami. Kromě toho je rovněž závislá na změně indexu lomu, tyto dva jevy způsobují změnu $\Delta\lambda_B$ z charakteristické vlnové délky dle rovnice 3.4. [12]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta(n\Lambda)}{n\Lambda} = \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} + \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} \right) \Delta T = a\Delta T, \quad (3.4)$$

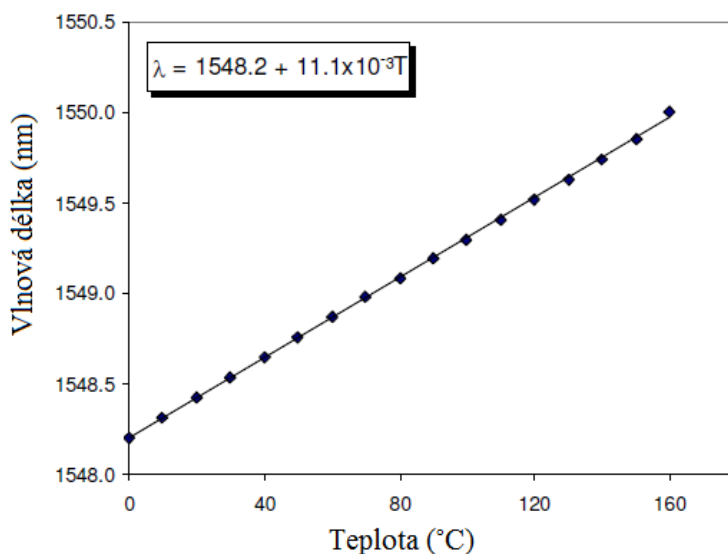
kde

$$\alpha = \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT}, \quad (3.5)$$

$$\zeta = \frac{1}{n} \frac{dn}{dT}, \quad (3.6)$$

koeficient teplotní roztažnosti α je $\sim 0,55 \times 10^{-6}$ a teplotně-optický koeficient ζ je 6,4 až $8,6 \times 10^{-6}$ (pro SMF28 vlákno GeO_2 dopované oxidem křemičitým).

Změna indexu lomu je jednoznačně dominantní efekt. Z rovnice 3.4. vyplívá citlivost pro 1550 nm Braggovskou mřížku 10,4 pm/°C. Na obr. 3.1 je Braggovská mřížka 1548,2 nm v závislosti na změně teploty. [12] [16]



Obrázek 3.1: Braggovská mřížka (1548,2 nm) v závislosti na změně teploty převzato z [12]

Snímání deformace

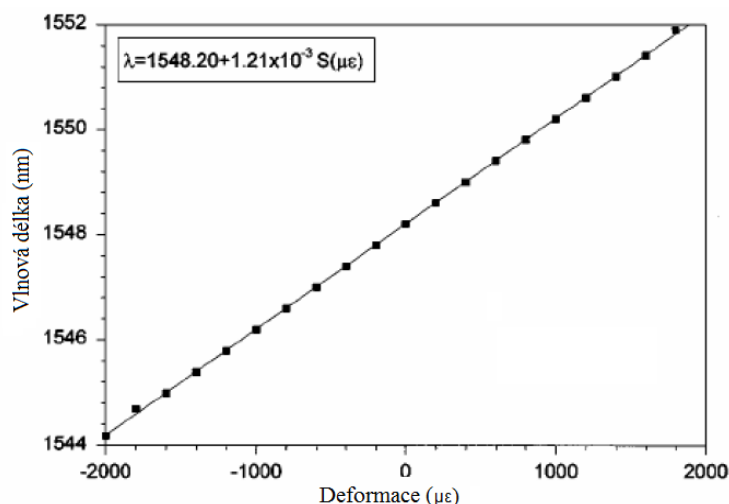
První člen v rovnici 3.1 představuje deformační vliv na optické vlákno. Což odpovídá změně rozestupu mřížek a deformaci vyvolané změnou indexu lomu, kde p_e je efektivní deformačně-optická konstanta definovaná rovnicí 3.7.

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})], \quad (3.7)$$

kde p_{11} a p_{12} jsou deformačně optické složky, n je index jádra a ν je Poissonův koeficient. Pro typické optické vlákno je $p_{11} = 0,113$, $p_{12} = 0,252$, $\nu = 0,16$ a $n = 1,482$, což vede k $p_e = 0,21$. Pomocí těchto parametrů a výše uvedené rovnice je očekávána citlivost 1,2 pm při ~1550 nm v důsledku $1\mu\epsilon$ na Braggovské mřížce. Experimentální výsledky posunu Braggovské centrální vlnové délky s namáháním na 1548,2 nm FBG mřížky jsou uvedeny na obr. 3.2. [12]

Tabulka 3.1: Citlivost FBG na teplotu, deformaci a tlak pro několik vlnových délek [12]

Citlivost	$\lambda=0,83 \mu\text{m}$	$\lambda=1,3 \mu\text{m}$	$\lambda=1,55 \mu\text{m}$
Teplotní [pm/°C]	5,6	8,7	10,4
Deformační [$\mu\epsilon$]	0,65	1,01	1,21
Hydrostatický tlak [pm/Mpa]	-2,4	-3,7	4,5



Obrázek 3.2: Braggovská mřížka (1548,2 nm) v závislosti na deformaci převzato z [12]

3.1 Vyšetřovací techniky

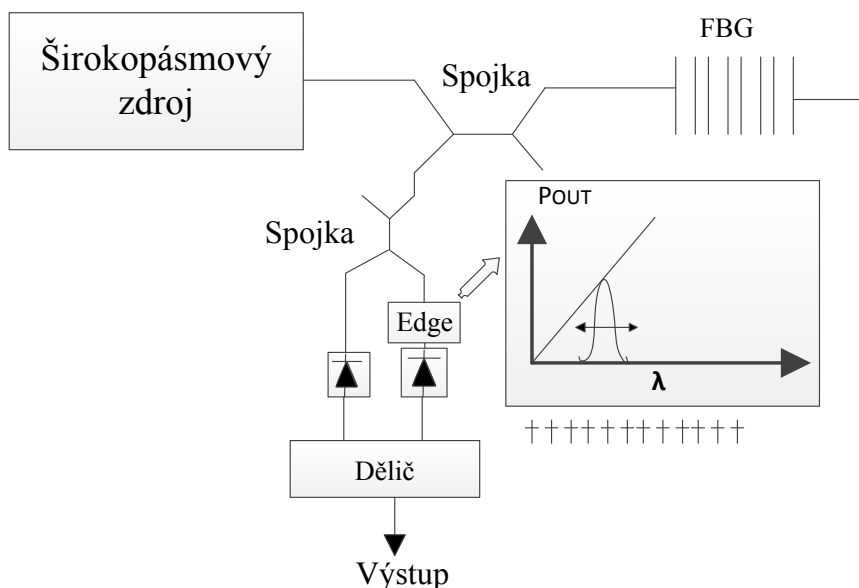
FBG optické snímače jsou založeny na principu, kdy informace jsou zakódovány do posuvu odražené vlnové délky Braggovské mřížky. Informace o vlnové délce má souvislost s měřenou veličinou v poloze snímače. Z toho důvodu primární práce senzoru FBG spočívá ve vyšetřování vlnových délek na Braggovském odrazu. Jednoduchým způsobem ověření může být použití spektrometru nebo monochromátoru. Žádný z nich však není oblíbený v praktických aplikacích vzhledem k jejich optickým vlastnostem, rozsahu, omezené rozlišovací schopnosti, nedostatku odolnosti a vysokým nákladům.

Obvykle není měření vlnové délky příliš jednoduché, proto se velmi často převádí posun vlnové délky k nějaké snadno měřené veličině, jako je amplituda, fáze nebo frekvence.

3.1.1 Převod vlnové délky na amplitudu

Měření amplitudy je nejběžnější přímý způsob použití u senzorů v optických vláknech. Převod vlnové délky na změnu amplitudy je jednoduchý a cenově výhodný.

Převod změny vlnové délky na změnu intenzity, lze identifikovat pomocí edge propustného filtru, který nabízí lineární vztah mezi změnou vlnové délky a výstupní intenzitou světla. Typické zapojení s edge filtrem znázorňuje obr. 3.3. Odražené světlo od FBG mřížky je rozděleno do dvou paprsků o stejné intenzitě. Jeden z paprsků je filtrován ještě před detekováním. Druhý paprsek, který slouží jako referenční, není filtrován před detekováním. Oba výstupní paprsky jsou pak zesíleny a přivedeny na analogový dělič. Poměr filtrovaného paprsku a referenčního paprsku poskytuje informaci o vlnové délce, aniž by utrpěl jakoukoliv změnu intenzity, díky výkonovému kolísání zdroje a ztrátám na spojích optických vláken. [14]

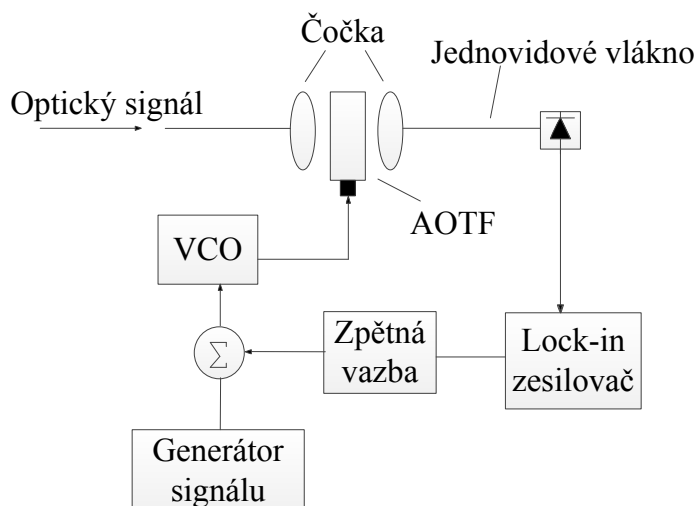


Obrázek 3.3: *Převod posunu vlnové délky na amplitudu pomocí edge filtru*

Tento přístup nabízí jednoduché a levné řešení pro měření posunu vlnové délky způsobené FBG senzory. Nicméně má omezené rozlišení měření. Pro systém znázorněný na obr. 3.3 se používá infračervený filtr typu horní propust, který poskytuje lineární rozsah od 815 nm do 838 nm. Získané rozlišení bylo přibližně 1% celkového měřicího rozsahu. [1]

3.1.2 Převod vlnové délky na frekvenci

Akusticko-optický laditelný filtr (AOTF) ukazuje závislost propuštěné vlnové délky na řídicí rádiové frekvenci. Posun vlnové délky je možné sledovat pomocí odchylky řídicí rádiové frekvence. Schéma tohoto přístupu je zobrazeno na obr. 3.4. V případě, že hodnota střední optické vlnové délky neodpovídá měřené vlnové délce, systém zpětné vazby ohlásí chybový signál a aplikuje ho na oscilátor řízený napětím (VCO) a ten naladí frekvenci. Tato technika může být použita pro detekci posunu vlnové délky z odraženého nebo přeneseného světla. Jiná verze kódování odrazu do vlnové délky je rozdělena na dvě části, jedna prochází AOTF a druhá je vedena přímo do druhého detektoru. Signály z obou detektorů jsou pak porovnány a poskytují chybový signál jako zpětnou vazbu. [1]



Obrázek 3.4: Vyšetřovací schéma využívající AOTF

3.1.3 Převod vlnové délky na fázi

V rámci tohoto přístupu je optické vlákno Mach-Zehnderova interferometru použito jako diskriminátor vlnové délky k detekci posunu vlnové délky FBG senzoru. Vyšetřovací systém pro jedno-mřížkový senzor zobrazený na obr. 3.5, používá širokopásmový zdroj. Odražená kódovaná vlnová délka od mřížky je přivedena do interferometru přes spojku. Z tohoto důvodu se tato Braggovská odrazivost chová jako zdroj modulace vlnové délky. Závislost vlnové délky na výstupu interferometru lze vyjádřit rovnicí 3.8.

$$I(\lambda) = A [1 + k \cos(\psi(\lambda))] , \quad (3.8)$$

kde $\psi(\lambda) = 2\pi nd / \lambda$, A je přímo úměrné vstupní intenzitě a ztrátám v systému, d je délka nerovnováhy mezi dvěma rameny, n je efektivní index lomu jádra, λ je vlnová délka odraženého světla od mřížky a k je interferenční viditelnost.

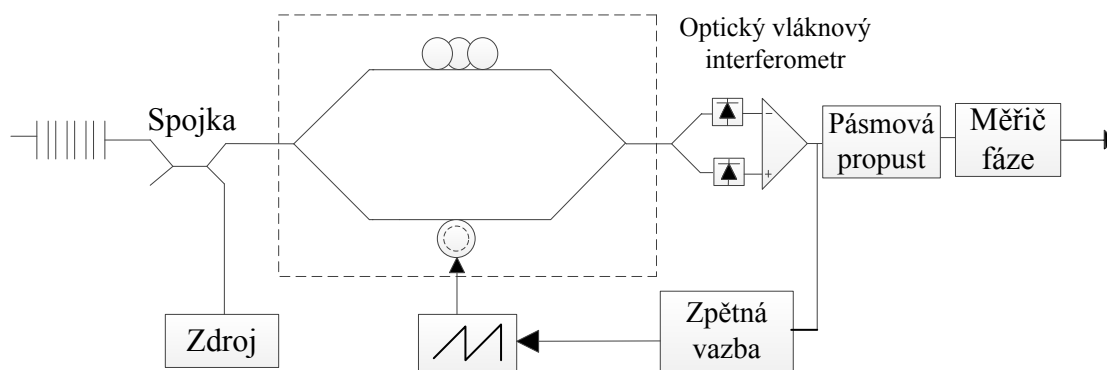
Pro dynamickou modulaci vlnové délky v Braggovském odrazu je změna fázového posunu $\Delta\psi(t)$ dána vztahem 3.9.

$$\Delta\psi(t) = - \frac{2\pi nd}{\lambda^2} \Delta\lambda \sin \omega t \quad (3.9)$$

Pro statické a pseudostatické posuny vlnové délky, se navrhuje pseudoheterodynní technika, která spoléhá na generování elektrického nosného signálu na výstupu. Změna jejich fázového posunu je popsána vztahem 3.10.

$$\Delta\psi(t) = - \frac{2\pi nd}{\lambda^2} \Delta\lambda + \frac{2\pi n}{\lambda} d(t) , \quad (3.10)$$

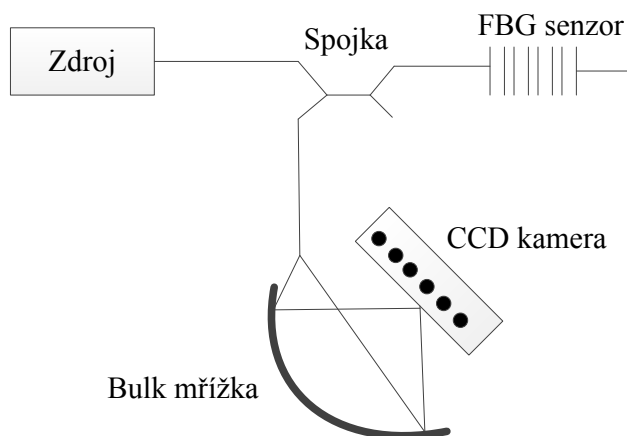
kde $d(t)$ je délka dynamické nerovnováhy stanovená piezoelektrickým měničem.



Obrázek 3.5: Vyšetřovací schéma využívající vláknový interferometr

3.1.4 Převod vlnové délky na umístění

Princip tohoto přístupu je stejný jako ve spektrometrii. Vyšetřovací techniky je dosaženo pevným disperzním prvkem (např. hranolem nebo mřížkou), který rozděljuje různé vlnové délky na různá místa difrakční mřížky. Jak je znázorněno na obr. 3.6, odražený pulz od senzorů FBG je naveden na bulk mřížku. Světlo při různých vlnových délkách bude ohnuto v různých směrech podél přímky. Lineární kamera (CCD) se používá tak, že světlo s různou vlnovou délkou se promítne do jiné pozice na CCD. Rozlišení měření pak závisí na prostorovém rozlišení bulk mřížky a počtu pixelů CCD. Tato technika byla nejprve použita pro sledování vláken s mřížkou o vlnové délce menší než 900 nm, vzhledem k spektrální odezvě CCD kamery, které byly prvně dostupné.



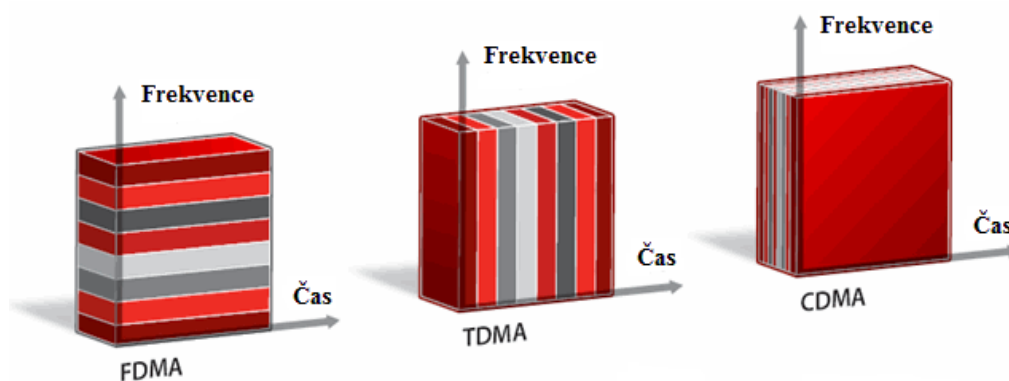
Obrázek 3.6: Schéma FBG snímače výsledku pomocí disperzního zařízení a CCD kamery

4 Multiplexní metody

V mnoha aplikacích je třeba velkého množství senzorů, aby se dosáhlo snímání parametrů ve více diskrétních bodech podél vlákna, tzv. kvazi-distribuovaného snímání. Těchto senzorů se využívá např. v inteligentních stavbách (strukturách), kde je pole senzorů vázané nebo vloženo do materiálu, který sleduje stav konstrukce. K těmto účelům se využívá multiplexování, což je způsob, jak použít stejný zdroj světla a zároveň začlenit velké množství senzorů do jednoho optického vlákna. Multiplexní přenos slouží hlavně k redukci počtu vláken a konektorů vedených na dané trase. Je mnoho způsobů, jak tuto metodu realizovat. Multiplexní metody se liší v počtu senzorů, které lze začlenit do vlákna, ve frekvenční odezvě snímače, dynamickém rozsahu, úrovni šumu, přeslechu a finančních nákladech. Nejdůležitější techniky pro multiplexování jsou metody využívající času a vlnové délky.

Základní dělení lze rozdělit do těchto tříd:

- **Časový multiplex (TDM)** – pro informaci ze senzoru je vyhrazen určitý časový úsek, ve kterém je přenášena informace
- **Vlnový multiplex (WDM)** – pro přenášenu informaci je vyčleněna určitá vlnová délka, do jejichž nosné vlny jsou data zakódována
- Frekvenční multiplex (FDM)
- Kódový multiplex (CDM)
- Prostorový multiplex (SDM)
- Hybridní schémata [1] [5]



Obrázek 4.1: Multiplexní metody (frekvenční, časová, kódová), převzato z [18]

4.1 Časový multiplex (TDM)

Časový multiplex nebo-li TDMA (Time Division Multiple Access) je několikanásobné využití kapacity přenosového vedení, optického nebo rádiového pásma. Pomocí časového dělení šířky pásma. Dělí se na větší počet kanálů nezávislých na sobě, které jsou přiřazovány pro

jednotlivá spojení. Časové dělení lze také použít na oddělení směrů přenosu po jedné trase. Využívá se u digitálních systémů.

Časová osa je rozdělena do časových rámců určité délky (např. $T = 0,125$ ms), které obsahují daný počet časových intervalů (time slotů = p). Každý takovýto interval slouží pro jiný kanál. Časový interval se dále dělí na určitý počet bitů, např. $B = 8$. Přenosová rychlost je pak pro takovýto kanál dána vztahem 4.1.

$$v = B * \frac{1}{T} [b/s] \quad (4.1)$$

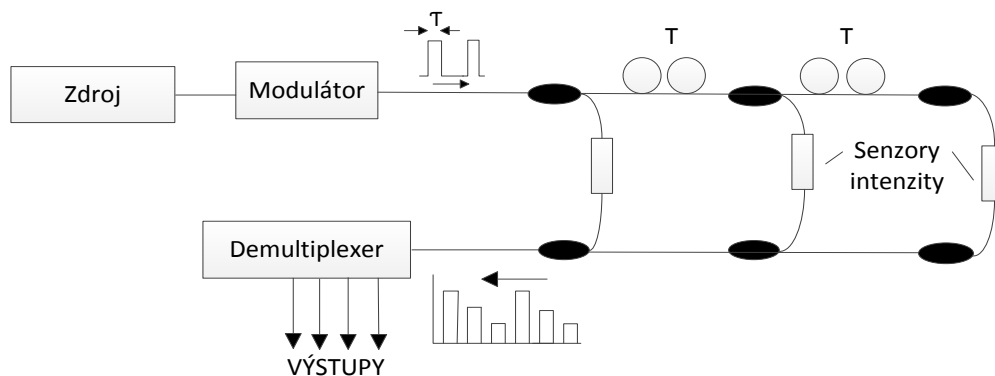
Celková přenosová rychlost digitálního systému je popsána vztahem 4.2.

$$w = v * p [b/s] \quad (4.2)$$

4.1.1 Sít' senzorů závislých na intenzitě

Použitím časového multiplexu TDM jsou senzory závislé na intenzitě uspořádané do sítě podle schématu na obr. 4.2. Senzory se umístí v různé vzdálenosti od zdroje a impuls, který je vyslán do senzorické části, vyvolá na výstupu ze senzoru sérii impulsů. Tyto impulsy reprezentují časové vzorky na výstupu ze senzoru překládané v časových intervalech. Potřebné trvání impulsu T je určené z optického zpoždění, způsobené šířením světla vedením a spojovacími komponenty na trase. Vzorkovací frekvence pro každý senzor v této topologii je vyjádřena počtem senzorů v síti. Pro N počet senzorů a zpoždění T mezi každým senzorem je dána maximální přípustná vzorkovací frekvence vzorcem 4.3. [11]

$$R_s = \frac{1}{NT} \quad (4.3)$$



Obrázek 4.2: Schéma TDM pro optické senzory závislé na intenzitě

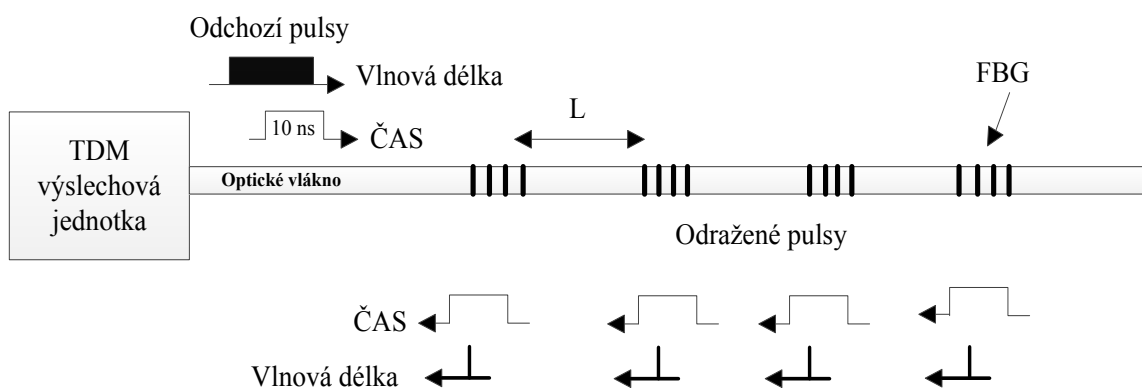
4.2 Multiplexování FGB senzorů

Metoda TDM je založena na adresování všech senzorů ve vlákně s rozdílným časovým zpožděním od zdroje a detektoru, s cílem dosáhnout kvazi-distribúvaného měření. Při sériovém zapojení senzorů odráží každý senzor část světla v omezené intenzitě, což ovlivňuje počet senzorů aplikovaných na jednom vlákně. Díky multiplexování se počet elektronických součástek podstatně sníží a tím i hmotnost soustavy. TDM má vysokou vzorkovací frekvenci a

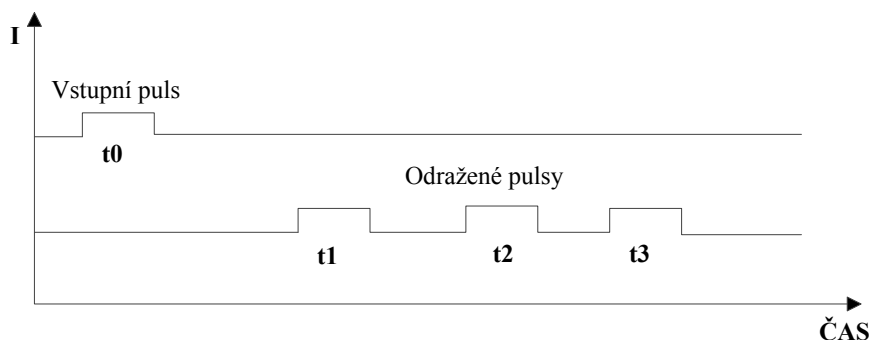
je cenově výhodnější než WDM, protože neobsahuje sofistikované lasery nebo filtry, také má vyšší stabilitu a životnost. Jsou vhodné pro použití v nepříznivém prostředí. Hlavním omezením TDM systému je, že senzory musí být dostatečně daleko od sebe, z důvodu popsaného níže v kapitole. [13] [8]

Obrázek 4.4 ukazuje schéma TDM vyšetřovacího systému vícenásobných FBG senzorů. V této multiplexní technice byly úzké optické pulzy vpuštěny do optického vlákna obsahující mnoho FBG z nízkou odrazivostí a se stejnou Braggovskou vlnovou délkou. Šíření světla podél trasy např. 1 metru optického vlákna tam a zpět trvá 10 ns. Každý senzor lze odlišit na základě měření času šíření signálů vracejících se k výslechové jednotce. Jeden optický pulz se skládá z mnoha složek vlnových délek, ale FBG senzory odráží jen jejich vlastní Braggovskou vlnovou délku. TDM technika je schopna multiplexu velkého počtu FBG senzorů bez použití selektivní složky vlnové délky. Typická přesnost měření vlnové délky pro WDM a TDM systémy jsou 1 pm a 10 pm. [9]

$$L > \frac{c \times 10 \text{ [ns]}}{2n} = 1 \text{ [m]} \quad (4.4)$$



Obrázek 4.3: Časové multiplexování na jednom vlákně pro pole FBG senzorů

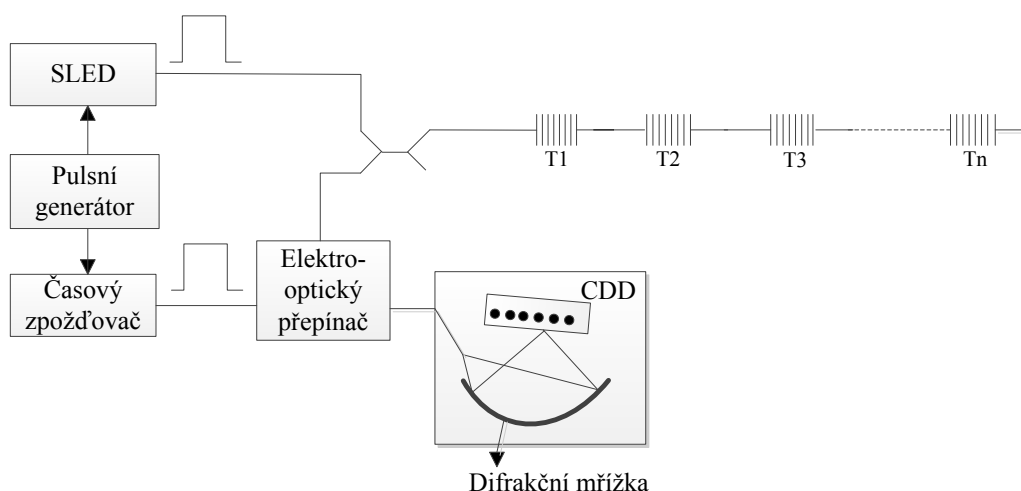


Obrázek 4.4: Princip průchodu pulzu TDM systémem s FBG

Vstupní pulz, procházející polem Braggovských mřížek rozestoupených po optickém vlákně, se odrazí od každé z mřížek. Vzniknou tak odražené pulzy časově posunuté vlivem průchodu světla optickým vláknem, jak je ukázáno na obr. 4.4.

4.2.1 Princip TDM Braggovského senzoru pro sledování zdravotního stavu

Typická konfigurace je znázorněna na obr. 4.5. Světelný zdroj generuje krátké optické pulzy. Je-li pulz přenášén v poli FBG mřížek, pak musí být vzdálenost senzorů od světelného zdroje délky L_i . FBG mřížky odrazí malou výkonovou část optického pulzu do optického přepínače prostřednictvím spojky.



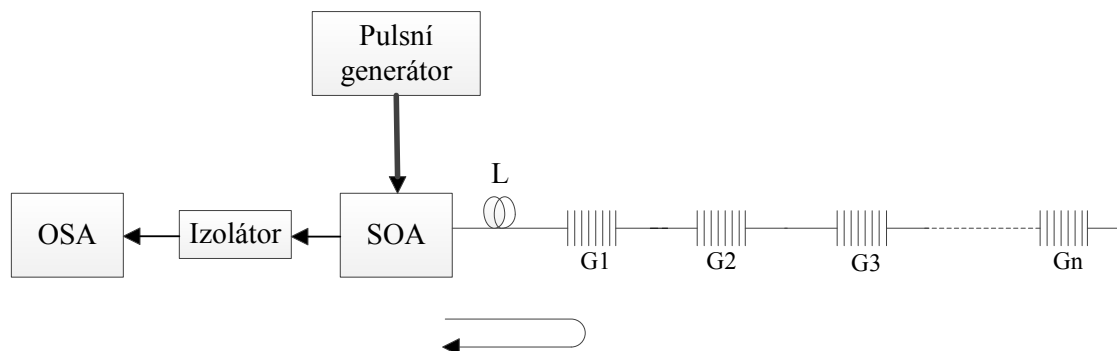
Obrázek 4.5: *Princip vyšetřování pomocí TDM FBG senzoru pro sledování zdravotního stavu*

Odražený pulz dorazí na optický přepínač se zpožděním dle vzorce 4.5.

$$\tau_i = \frac{2n_{eff}L_i}{c} \quad (4.5)$$

Dobu zpoždění optického přepínače lze nastavit pro jakýkoliv z FBG senzorů a odražené spektrum tohoto konkrétního senzoru se změří pomocí CCD detektoru. Změnou zpoždění každého senzoru je pak možné vyslyšet odražené spektrum. Avšak interval mezi odraženými pulzy může být velmi krátký pro husté sensorové pole a rychlost elektro-optického přepínače nemusí být schopna se tomu přizpůsobit.

Alternativou k elektrickému hradlování je optické hradlování. Pro přenos a zesílení odrazů na jedné mřížce v poli se používá optický modulátor. Odrazy od izolované mřížky jsou začleněny v čase a je získána vlnové délka. TDM systém založený na optickém hradlování používá polovodičový zesilovač (SOA), jak je ukázáno na obr. 4.6.

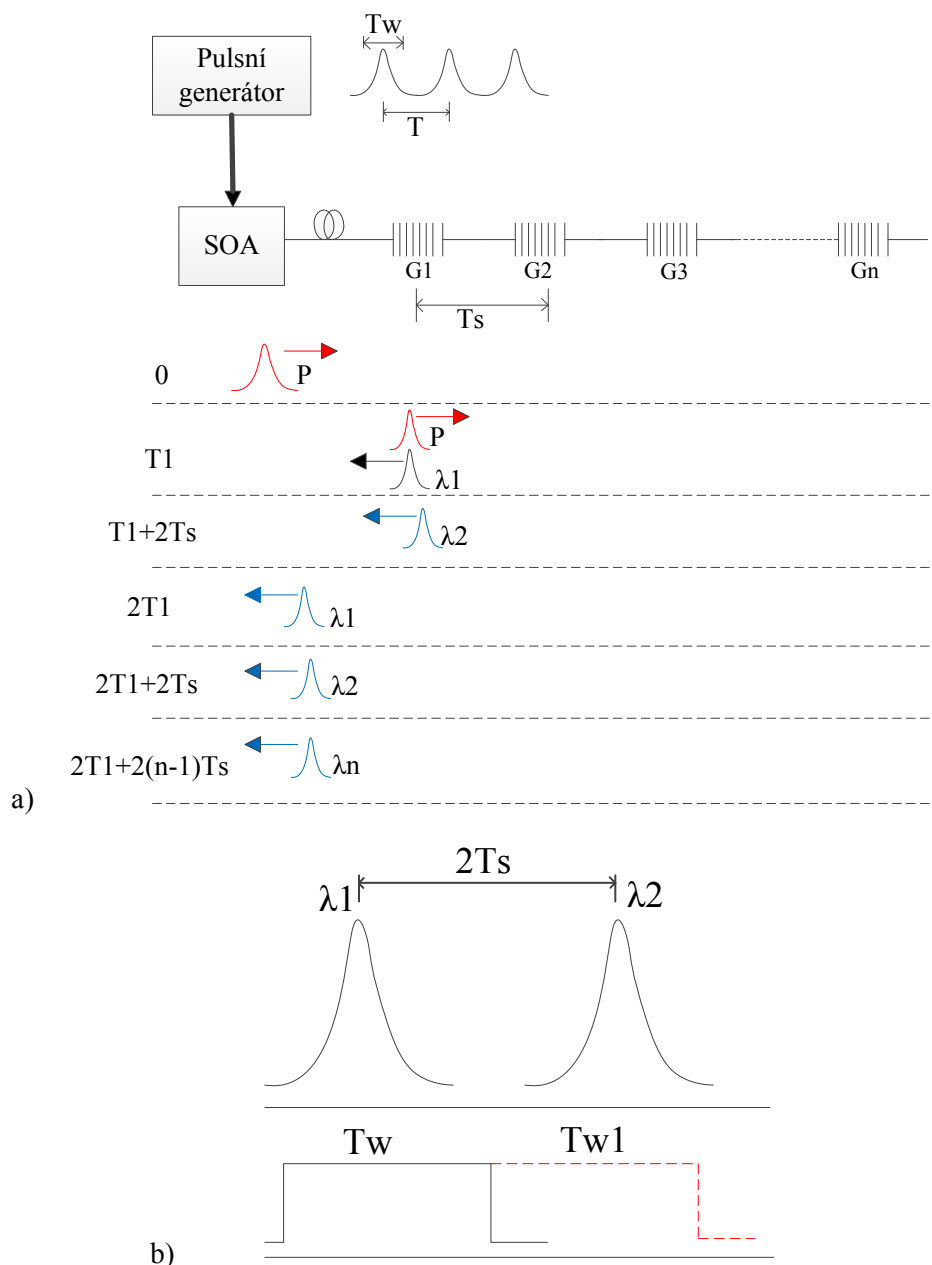


Obrázek 4.6: TDM systém založený na optickém hradlování

Převážně se SOA používá při stále zapnutém stavu jako zesilovač v telekomunikačních sítích. Zde, v návrhu TDM výsledku ji pohání programovatelný generátor krátkých pulzů s vysokým výkonem. Pokud je SOA aktivována, obvod způsobí, že SOA bude vyzařovat krátké širokopásmové optické pulzy skrz generování zesílené spontánní emise (ASE). To znamená, že SOA je použit jako zdroj světla. Vygenerovaný širokopásmový pulz směřuje k poli FBG senzorů přes vlákno cívkou L na FBG senzory ve vzdálenosti L_i . Když dorazí pulz k senzoru, začne šíření odrazu malé intenzity zpět směrem k SOA.

V čase τ_i (viz. rovnice 4.5), při odrazu od jednotlivých FBG senzorů, které dorazí k SOA se budící obvod SOA opět zapne. Slabý odražený signál projde SOA a je zesílen. Zesílený signál projde izolátorem a je změřen optickým spektrálním analyzátozem (OSA). Zpoždění τ_i generátoru lze měnit a tak je možné zjistit jakýkoliv FBG senzor v poli. SOA může pracovat v režimu vysokorychlostního přepínače s minimálním časovým zpožděním v délce 1 ns.

Princip funkce přepínače je znázorněn na obr. 4.7a). První elektrický řídicí pulz je přiveden na SOA a optický širokopásmový pulz P je generován a vpuštěn do daného pole senzorů. V čase T_1 , část optického pulzu P je odražen mřížkou G_1 se spektrálním pulzem Braggovské vlnové délky λ_1 směrem k SOA. Zbytek optického pulzu P pokračuje směrem k ostatním mřížkám. V době $2T_1$, druhý řídicí pulz působí na SOA, což způsobí vygenerování druhého optického pulzu P , který je vpuštěn do vlákna ve stejné době. První odražený pulz λ_1 přichází zpět na SOA. Vzhledem k tomu, že je SOA zapnuta, bude pulz přenesen a zesílen, jak je popsáno výše. První odražený pulz λ_1 se pak šíří do OSA. Nicméně, v tuto stejnou dobu zbytek prvního pulzu P dorazí na mřížku G_2 , kde se část odrazí a vytvoří druhý odražený spektrální pulz na Braggovské vlnové délce λ_2 . V čase od $2T_1$ až $2T_1+2T_s$, pulzy λ_1 a λ_2 dorazí na SOA ve stejném pořadí. V čase kdy SOA je T_w a interval mezi optickými pulzy λ_1 a λ_2 je $2T_s$.



Obrázek 4.7: a) Princip funkce přepínače b) nutná podmínka

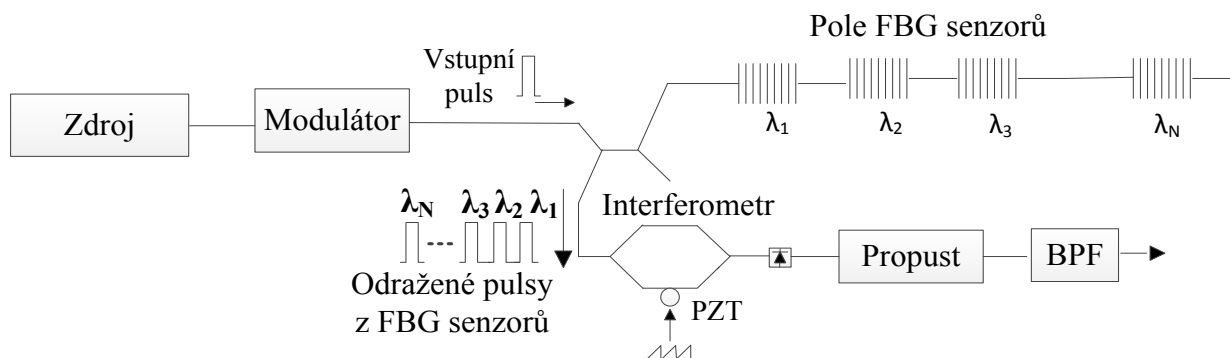
V případě, že šířka pulzů T_w je více než interval $2T_s$, jak je ukázáno červeně na obr. 4.7b), pak OSA nedokáže rozlišit λ_1 od λ_2 . Proto v tomto TDM systému by měla být šířka pulzů nižší než minimální časový interval mezi dvěma sousedními senzory. [10]

4.2.2 Kombinace TDM a interferometrické detekce

Pulsní světlo ze širokopásmového zdroje (LED) je navedeno do vlákna obsahující FBG senzory s různými maximí odražené vlnové délky (λ_B) podél vlákna. Šířka vstupního impulzu musí být rovna, nebo menší než doba, kterou urazí odražené světlo mezi dvěma sousedními mřížkami. Odražené pulzy z každé mřížky se poté oddělí na výstupu v čase. Odražené impulzy

jsou vedeny přes Mach-Zehnderův interferometr (MZI) jako na obr. 4.8, který slouží jako detektor posunu vlnové délky. Jednotlivé snímače impulsů mohou být demultiplexovány pomocí elektrického obvodu schopného hradlování výstupního signálu. Poté se detekují fáze, díky kterým dojde k obnovení informace ze senzoru pro všechny kanály.

Počet multiplexovaných FBG senzorů závisí na šířce pulzu, rovnající se oddělovací vzdálenosti mezi dvěma sousedními mřížkami. [1]

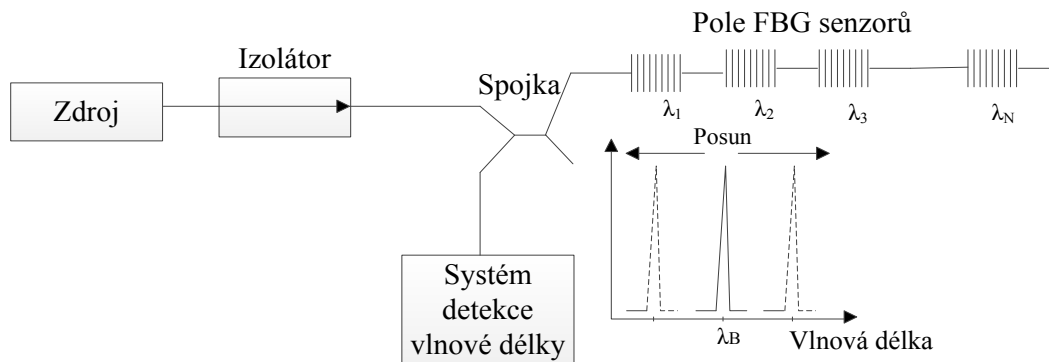


Obrázek 4.8: Schéma TDM systému

V případě TDM, Weis a spol. [15] prokázali čtyř prvkové pole demodulované pomocí jednoho nevyváženého Mach-Zehnderova interferometru. Rozlišení deformace $\sim 2 \text{ n}\epsilon/\text{Hz}^{1/2}$ bylo prokázáno pro frekvence větší než 10 Hz, s přeslechem mezi kanály menším než 30 dB pro systém s 1300 nm ELED zdrojem o síle $\sim 250 \text{ }\mu\text{W}$. Hlavním nedostatkem je, že se zvyšujícím se počtem senzorů se zhoršuje poměr signálu k šumu. Berkoff a Kersey [17] dosáhli deformačního rozlišení $2 \text{ }\mu\epsilon$ pro osmi-senzorový TDM systém s MZI nahrazeným integrovaným optickým diskriminátorem vlnové délky, který poskytuje široký rozsah a dobrou stabilitu pro kvazi-statická měření. [3]

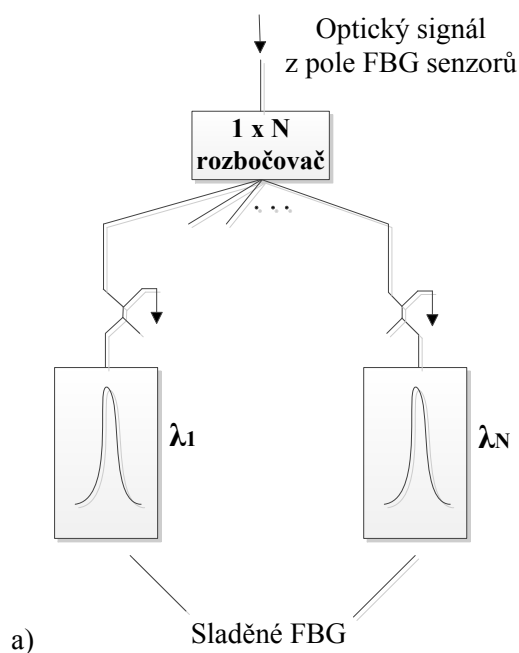
4.3 Vlnový multiplex (WDM)

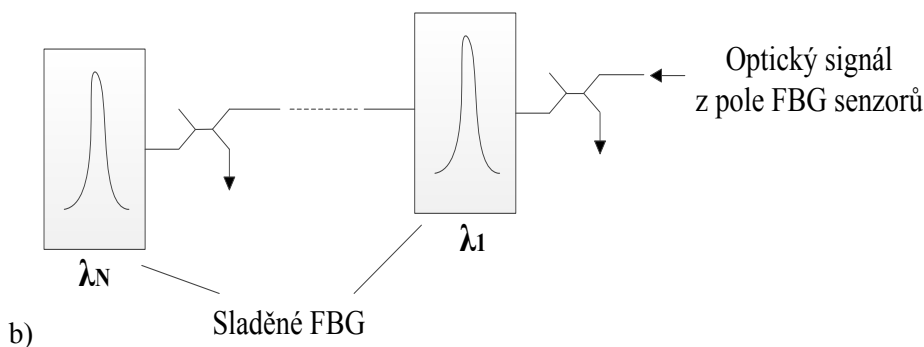
Jedná se o nejjednodušší techniku multiplexování FBG senzorů využívající kódování vlnové délky. WDM systémy na rozdíl od TDM vyžadují vysokou odrazivost FBG senzorů, každý pracující na samostatné vlnové délce. Pracuje s doménou vlnových délek. Vzdálenost mezi mřížkami může být tak krátká, jak přesné distribuované informace o měřených veličinách chceme získat. Základní konfigurace WDM je zobrazena na obr. 4.9. Braggovské mřížky jsou všechny na jednom vlákně buzené LED zdrojem. Odražený signál z každé z mřížek je veden do systému detekující vlnovou délku. Pro rozlišení posunu vlnové délky každé FBG se používá např. Fabry-Pérotův filtr. [1]



Obrázek 4.9: Snímací systém FBG senzorů s WDM

Na obr. 4.10a) je znázorněna paralelní technologie používající se pro současné vyšetřování všech senzorů s WDM. Vláknový rozbočovač je použit k rozdělení optického svazku vedeného z pole FBG senzorů do N kanálů. V každém kanálu je FBG mřížka, detekující posun vlnové délky konkrétního FBG senzoru. V každém kanálu je výkon $< 0,5 N$, jelikož je použito N kanálů a v každém je spojka. Čím více je FBG senzorů tím menší je výkon v jednotlivých kanálech. Efektivnější využití výkonu lze dosáhnout použitím sériového zapojení mřížek dle obr. 4.10b). [1]



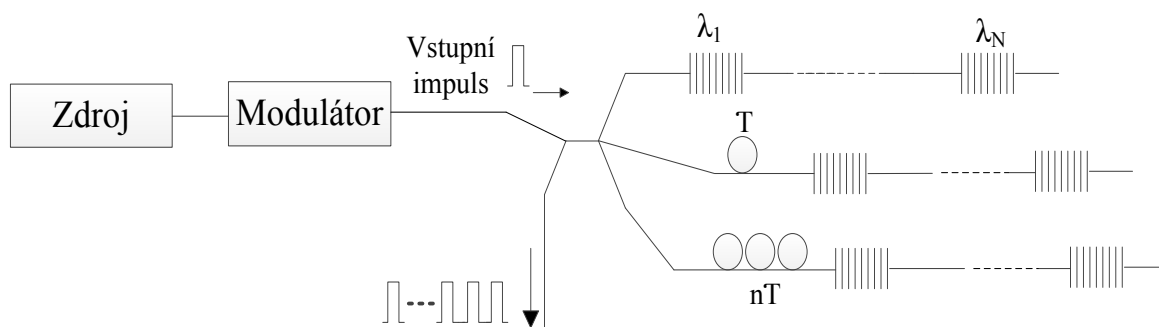


Obrázek 4.10: a) paralelní zapojení a b) sériové zapojení WDM

4.3.1 WDM/TDM

WDM umožňuje použití desítek FBG senzorů na jednom vlákně, ale v kombinaci s TDM můžeme toto číslo znásobit několikrát opakovaným použitím spektra vlnové délky. Smíšené WDM/TDM se používá v sériové konfiguraci, kde je několik WDM polí FBG mřížek zřetězeno [17]. Každé pole mřížek je umístěno v odlišné vzdálenosti podél vlákna. Tyto FBG jsou vyrobeny s nízkou odrazivostí. Krátký pulz světla ze širokopásmového zdroje bude odražen zpět na detektor, a to postupně v časových intervalech. Detekční elektronika je konstruována tak, aby reagovala na odražené signály pouze během vybraného časového intervalu, který odpovídá jedinému WDM poli FBG senzorů. Nicméně, v této sériové konfiguraci dochází k přeslechu vlivem vícenásobného odrazu mezi FBG, protože mají stejnou Braggovskou vlnovou délku.

Tento problém řeší paralelní uspořádání na obrázku 4.11, které eliminuje tento efekt. Vstupní pulz je rozdělen do několika WDM senzorových polí. Definovaná délka předřadných vláken u jednotlivých polí WDM způsobuje zpoždění. V důsledku použití vláknového rozbočovače je snížena celková optická účinnost. [1]



Obrázek 4.11: Paralelní konfigurace kombinovaného WDM/TDM

5 Návrh kvazi-distribuo­vaného FBG senzoru

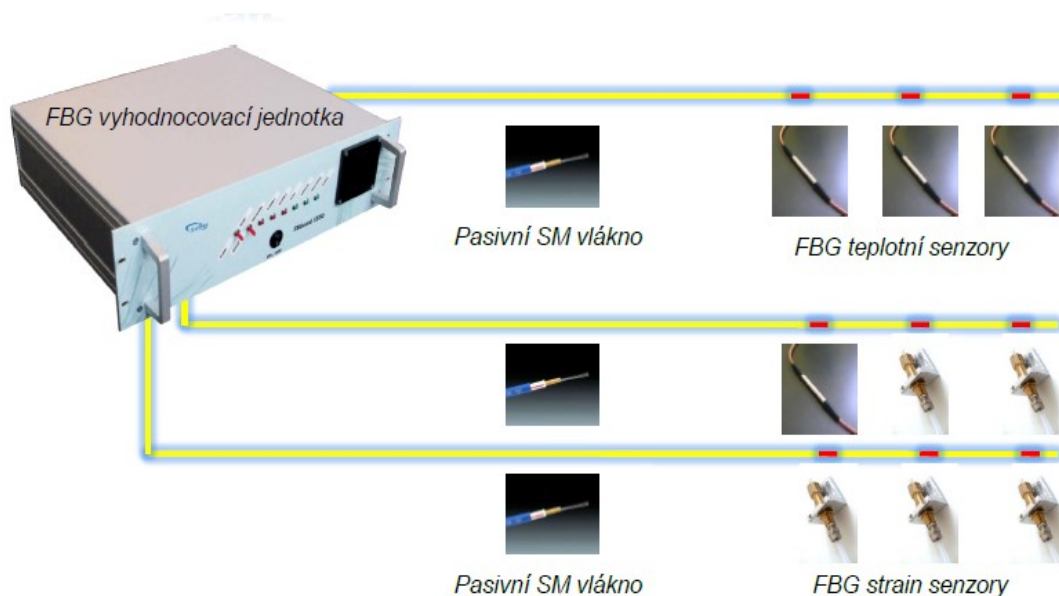
Optický senzor tohoto typu lze využít v mnoha aplikacích, jako je stavebnictví, zdravotnictví, v přírodních vědách a dalších výzkumech. Konkrétně například jako monitorovací zařízení teploty v různých tunelech, dolech, metru, skládkách, produktovodů (obr. 5.2), podzemních zásobnících plynu a podobných prostorech, kde hrozí vznik požáru. Díky takovému senzoru lze monitorovat zvyšující/snižující se teplotu v určitém místě tunelu a jiných prostorech/zařízeních s instalovaným optickým vláknem. Bude tak možné rychleji zareagovat na riziko hrozící havárie.

V reálných podmínkách ovlivňují měření čtyři základní faktory:

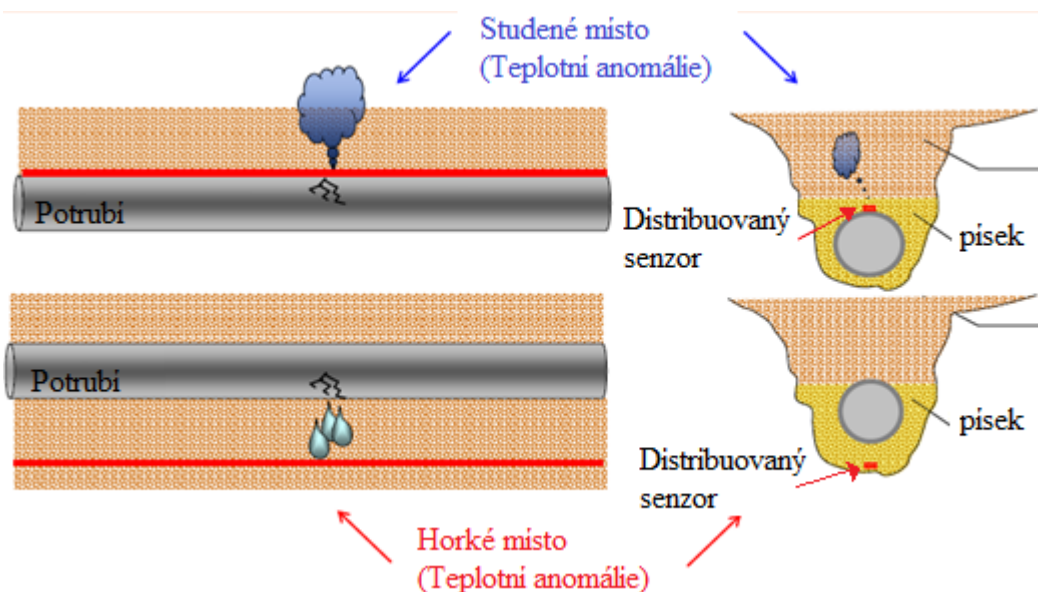
- délka trasy,
- prostorové rozlišení,
- rozlišení teploty,
- čas potřebný pro měření (průměrování naměřených hodnot).

Například prostorové rozlišení 1 m na vzdálenosti 10 km znamená 10 tisíc měřících bodů a je tak zřejmé, že pro rozlišení teploty $\pm 1^\circ\text{C}$ je zapotřebí delšího času průměrování získaných hodnot než pro rozlišení $\pm 5^\circ\text{C}$.

Velkou výhodou je možnost použití standartních komunikačních vláken, jak mnohovidových, tak v případě větších vzdáleností i vláken jednovidových. Ukázka reálné vyhodnocovací jednotky od firmy Safibra je na obr. 5.1. Dokáže měřit desítky bodů na jednom kanále.



Obrázek 5.1: Bodové senzory zapojené do série s možností měřit desítky bodů na jednom kanále



Obrázek 5.2: *Princip monitoringu produktovů*

Tomuto specifickému použití musí tedy odpovídat parametry senzoru. Snímat budu teplotu v rozmezí -20°C až 200°C , což považuji za dostatečný rozsah pro detekování hrozící havárie. Tento senzor bude mít přesnost v řádu jednotek $^{\circ}\text{C}$.

Veškeré návrhy a simulace jednotlivých částí a posléze i celého senzoru využívajícího časový multiplex jsem prováděl v počítačové simulaci prostřednictvím komerčního softwaru Optisystem 13 od kanadské firmy Optiwave. Prostřednictvím tohoto systému lze navrhovat a simulovat optické přístupové sítě. Více informací o Optisystemu jsou k nalezení na internetové stránce www.optiwave.com.

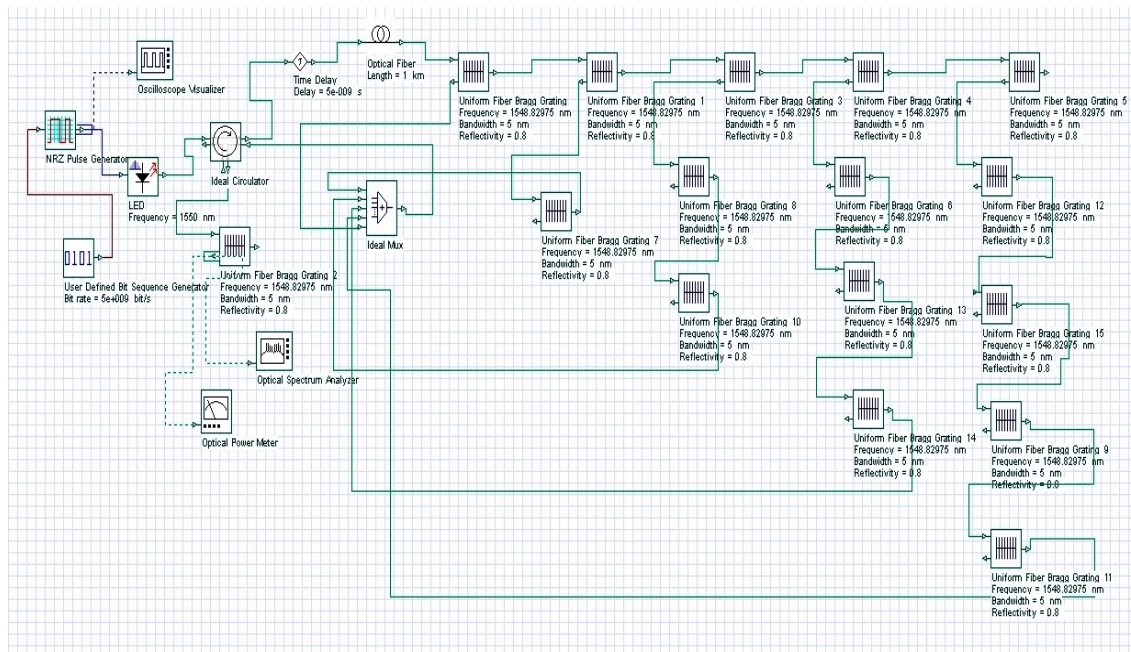
5.1 Návrh FBG senzoru

Prvním krokem bylo pomocí závislosti Braggovských mřížek na teplotu a deformaci navrhnout senzor, detekující posun vlnové délky vlivem změny těchto dvou veličin. Nejprve jsem navrhnul část senzoru, na kterém bude nastavována teplota. To jsem provedl pomocí Braggovských mřížek zapojených do jednoho bloku (subsystému).

5.1.1 Důvod vytvoření subsystému

Subsystém je označení pro blok obsahující dvě Braggovské mřížky propojené spolu pomocí spojky viz. obr. 5.4. Hlavním důvodem pro vznik takového subsystému je úspora Braggovských mřížek a náročnost na sestavení tohoto senzoru. Pokud bude třeba zapojit více senzorů (desítky, stovky) za sebou na jednom vlákně a budu chtít detekovat odražený signál z každé z nich, je třeba velkého počtu mřížek na samotné vyhodnocování. Zapojení způsobem na obr. 5.3 navíc nelze aplikovat v reálných podmínkách. Není ani technicky možné, aby odražený výkon procházel zpět do předchozí mřížky v prostředí Optisystemu. Navíc by změřená hodnota odraženého výkonu odpovídala výkonu z více FBG mřížek a ne výkonu

konkrétní mřížky ovlivněné teplotou. Díky tomu by velmi narostl počet potřebných FBG mřížek viz. tab. 5.1. Pomocí subsystému složeného ze dvou FBG mřížek zásadně zjednoduším zapojení a počet použitých FBG mřížek na dané trase k detekování odraženého výkonu. Náročnost sestavení subsystému a zapojení bez použití takového bloku lze porovnat na obrázcích 5.3 a 5.4. Další výhodou subsystému je snadné nastavení parametrů FWHM, odrazivosti a teploty, které jsem v simulaci často měnil.



Obrázek 5.3: Ukázka návrhu zapojení 5 FBG senzorů bez použití subsystému

Tabulka 5.1: Porovnání počtu FBG při použití / nepoužití subsystému

Počet senzorů	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20
Počet FBG bez subsystému	1	3	6	10	15	21	28	36	45	55	210
Počet FBG se subsystémem	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	40

Navyšování FBG mřížek si lze představit touto posloupností:

$$m = n + (n - 1) + (n - 2) + (n - 3) + \dots + (n - n), \quad (5.1)$$

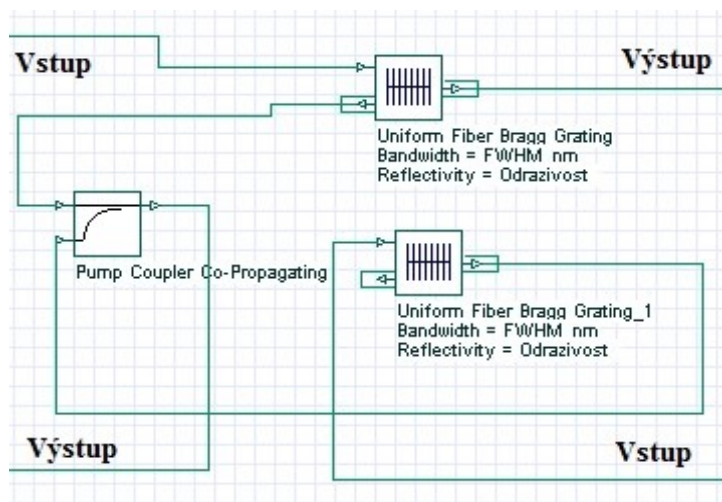
pro $m, n \in \mathbb{N}$,

kde m je počet FBG mřížek a n je počet senzorů.

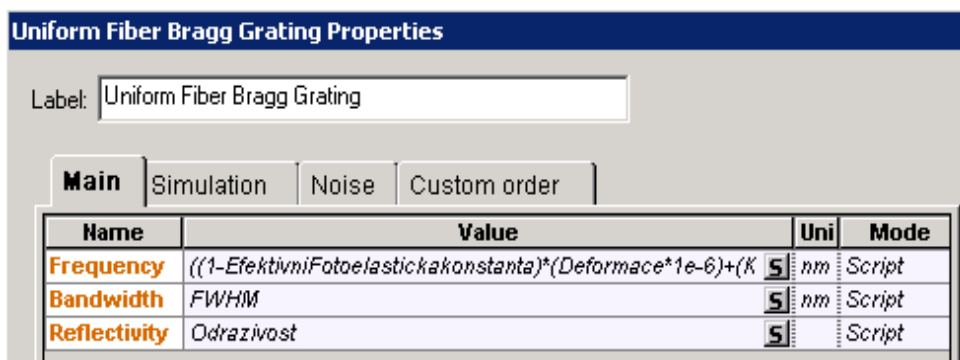
5.1.2 Subsystém

Navrhnutý subsystém můžete vidět na obr. 5.4. Skládá se ze dvou totožných Braggovských mřížek propojených pomocí spojky a mnohem více se podobá reálnému

propojení více FBG. Obsahuje dva vstupy a dva výstupy. Výhody použití tohoto bloku jsou popsány v předchozí podkapitole 5.1.1. Parametry obou mřížek jsou totožné. Byly nastaveny pomocí skriptu. Skript je nastaven tak, aby si hodnoty šířky spektra, odrazivosti a vlnovou délku vypočetl z hlavního nastavení parametrů, definovaných pro celý subsystém (obr. 5.6). Ukázka nastavení parametrů mřížek uvnitř subsystému je na obr. 5.5.



Obrázek 5.4: Schéma zapojení subsystému



Obrázek 5.5: Nastavení parametrů FGB mřížky uvnitř subsystému

Mým úkolem bylo implementovat veškeré proměnné obsažené ve vzorcích 3.1 v teoretické části této práce do navrženého subsystému. Tyto proměnné slouží k určení posunu vlnové délky vlivem změny teploty a deformace. Tento subsystém umožňuje nastavit posun vlnové délky, jak vlivem změny teploty, tak vlivem deformace. Měření deformace není mým úkolem, proto bude její hodnota nastavena na 0 $\mu\text{strainu/pm}$. Obrázek 5.6 ukazuje všechny parametry potřebné k vyhodnocení posunu vlnové délky. Byly využity také vzorce 3.5 a 3.6 pro zjištění deformační a teplotní citlivosti FBG mřížky. Pomocí nich jsem na jednotlivých mřížkách ovlivněných teplotou pomocí skriptu vypočetl posun vlnové délky zvětšený o centrální vlnovou délku λ_B . Braggovská vlnová délka λ_B je také nastavena v subsystému (obr. 5.6) pod označením **LambdaB**.

Ukázka skriptu pro výpočet posunu vlnové délky je zde:

$$\begin{aligned} & ((1 - \text{EfektivniFotoelastickakonstanta}) * (\text{Deformace} * 1e6) + \\ & + (\text{KoeficientTepelneRoztaznosti} + \text{TeplotneOptickyKoeficient}) * \\ & * \text{Teplota}) * \text{LambdaB} + \text{LambdaB} \end{aligned}$$

Jednotlivé proměnné a konstanty (**EfektivniFotoelastickakonstanta**, **KoeficientTepelneRoztaznosti**, **TeplotneOptickyKoeficient**) odpovídají názvům ze vzorců popsaných v teoretické části. Proměnné **Deformace** a **Teplota** jsou měřené hodnoty.

Dále byla vytvořena proměnná pro nastavení šířka spektra (**FWHM**) a odrazivosti (**Odrzivost**).

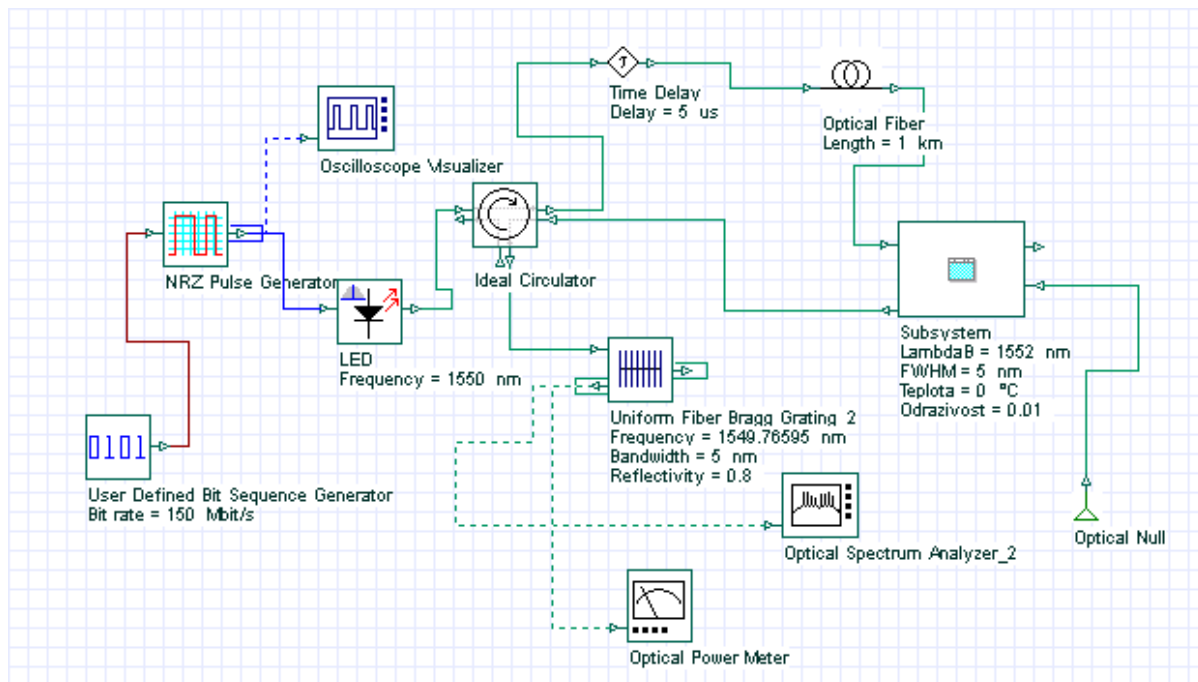
Name	Value	Units	Mode
Subsystem Representation	Default Icon		Normal
Image Filename	...		Normal
Stretch Image	<input type="checkbox"/>		Normal
LambdaB	1552	nm	Sweep
FWHM	5	nm	Normal
Teplota	0	°C	Normal
Odrzivost	0.01		Normal
Deformace	0	µstrain/pm	Normal
p11	0.113		Normal
p12	0.252		Normal
v	0.16		Normal
n	1.482		Normal
TeplotniCitlivost	(KoeficientTepelneRoztazn		Script
DeformacniCitlivost	(1-EfektivniFotoelastickako		Script
KoeficientTepelneRoztaznosti	0.55e-006		Normal
TeplotneOptickyKoeficient	7e-006		Normal
EfektivniFotoelastickakonstanta	((n*n)/2)*(p12-(v*(p11+p12)		Script

Obrázek 5.6: Nastavení parametrů subsystému

5.1.3 Schéma zapojení senzoru

Obvod je složen ze širokopásmového LED zdroje pracujícího na vlnové délce 1550 nm se šířkou spektra 48 nm, který vysílá světelné pulzy v intervalu nastaveném pomocí generátoru. Tento světelný pulz putuje přes cirkulátor na DELAY (zpožďovač), kterým simulují čas potřebný k přenosu světla optickým vláknem. Odtud prochází pulz do optického vlákna, jehož délku lze simulovat časovým zpožďovačem. Podrobnější nastavení délky vlákna a zpožďovače je vysvětleno v kapitole 6. Z optického vlákna se světelný pulz šíří do subsystému popsaném v kapitole 5.1. z něhož se část výkonu odrazí od FBG mřížky a většina výkonu prochází k dalšímu senzoru na trase. Tento odražený pulz směřuje opět do cirkulátoru, ke kterému

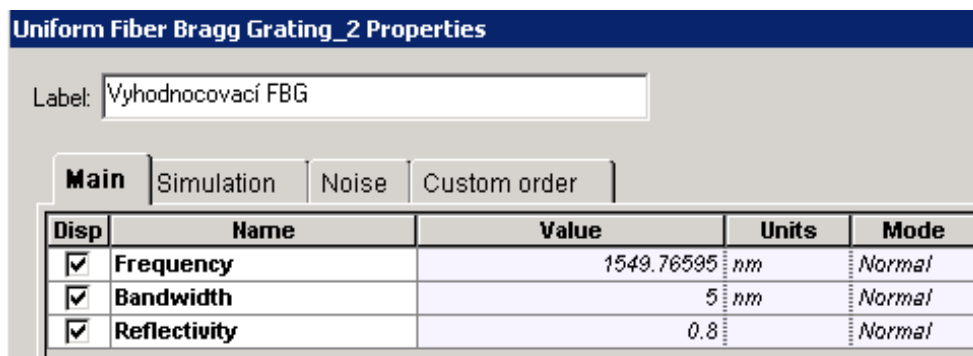
je připojena další Braggovská mřížka. Tato mřížka slouží k vyhodnocení posunu vlnové délky a posléze teploty, pomocí vyhodnocovací metody popsané v kapitole 5.1.4.



Obrázek 5.7: Schéma zapojení FBG senzoru v prostředí Optisystem

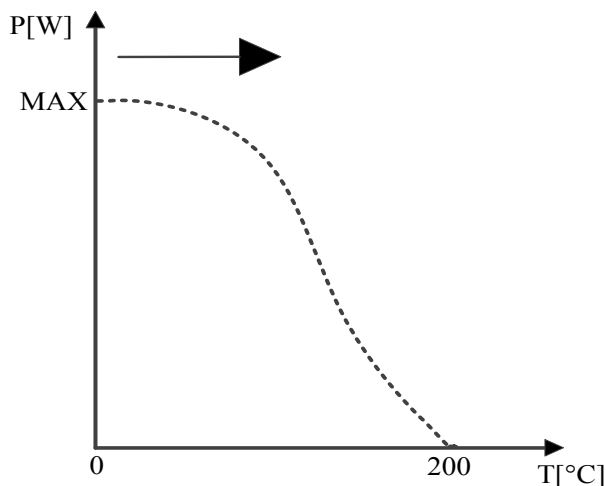
5.1.4 Princip vyhodnocení měřené teploty

Vyhodnocovací mřížka byla nastavena na 1549.76595 nm, což odpovídá teplotě -20°C na FBG měřící mřížce. Tuto teplotu jsem určil jako nejnížší možnou měřenou teplotu senzoru. Když jsem určil nejnížší teplotu, věděl jsem, že v tomto místě bude maximální výkon, protože se zvyšující se teplotou odražený výkon bude klesat, jak je zobrazeno na obr. 5.9.



Obrázek 5.8: Nastavené parametry vyhodnocovací FBG mřížky

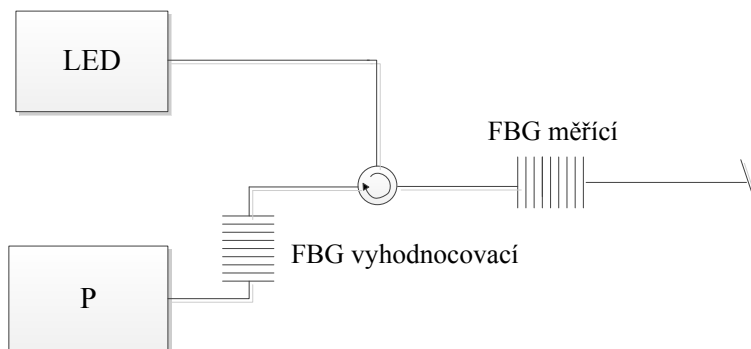
Pokud bude vyhodnocovací FBG mřížka (FBG vyhodnocovací na obr. 5.10) nastavena na vlnovou délku 1549.76595 nm dostanu maximální odražený výkon z měřící FBG při -20°C (FBG měřící na obr. 5.10). Jelikož by se plochy spekter obou mřížek překrývaly v centrální Braggovské vlnové délce.



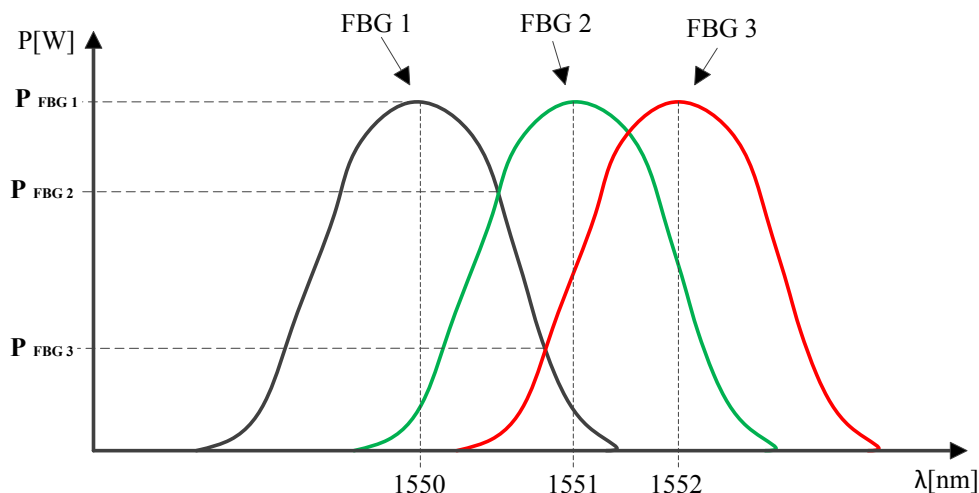
Obrázek 5.9: Pokles výkonu vlivem změny teploty z 0°C na 200°C

Změnou teploty na měřené mřížce (FBG měřící) např. na 200°C se posune vlnová délka na 1552.3405 nm (FBG3 obr. 5.11). Výpočet tohoto posunu zjistím pomocí skriptu popsáno v kapitole 5.1. Tato změna způsobí, že průnik plochy spekter odraženého výkonu pro měřenou a vyhodnocovací Braggovskou mřížku už nebude v maximu, ale posune se po linii křivky směrem vpravo. Díky čemuž bude detekovaný výkon na vyhodnocovací mřížce nižší než při přesném překrývání spekter (obr. 5.9).

Takto se lze posunovat po celé křivce připomínající křivku gausovu, jak je vidět na obr. 5.10. Tímto principem se bude měnit velikost odraženého výkonu při jakékoliv změně teploty a díky tomu lze snadno určit, o jakou teplotu se jedná, pomocí převodu na kalibrační rovnici (kapitola 5.3).

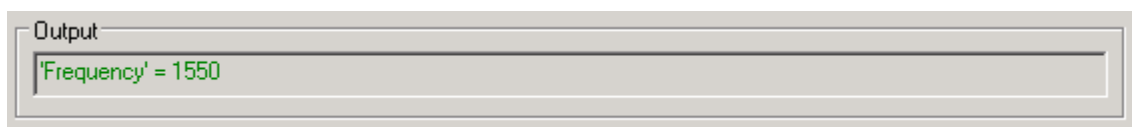


Obrázek 5.10: Blokové schéma zapojení pro převod posunu vlnové délky na amplitudu pomocí dvou FBG se vzájemně překrývajícími spektry

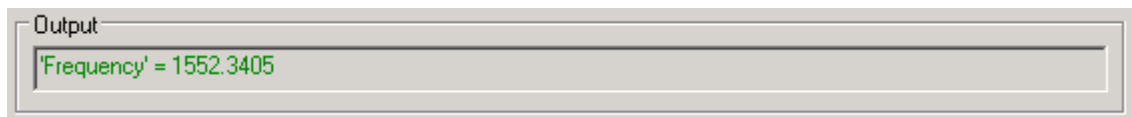


Obrázek 5.11: Posun vlnové délky vlivem změny teploty na měřící FBG (FBG1=0°C, FBG2 ≈100°C, FBG3 ≈200°C)

Ukázka posunu vlnové délky vlivem změny teploty na měřící mřížce (FBG měřící) z 0°C na 200°C zobrazenou pomocí výpočtu ze skriptu je vidět na obr. 5.12 a 5.13.



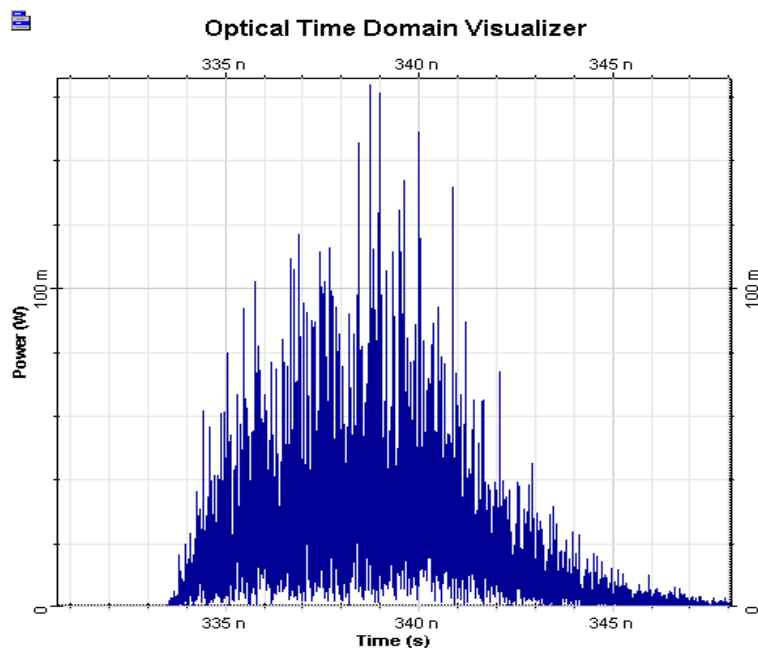
Obrázek 5.12: Vlnová délka pro 0°C



Obrázek 5.13: Vlnová délka pro 200°C

5.2 Měření teploty pomocí FBG senzoru v Optisystemu

Po nastavení všech hodnot v subsystému a ověření funkčnosti měření posunu vlnové délky vlivem teploty a deformace následovalo oživení senzoru dodáním světelného pulzu. Na vyhodnocovací Braggovskou mřížku byl připojen výkonový měřicí přístroj, který převádí optický výkon na digitální podobu, díky čemuž lze získat hodnoty odraženého výkonu od měřící Braggovské mřížky. Výkonový měřicí přístroj dokáže vyhodnocovat více druhů měřeného výkonu. Mnou čtená hodnota byla velikost středního výkonu (Mean power). Z důvodu lepší vypovídací hodnoty, jelikož by při měření např. hodnoty maximálního odraženého výkonu byly výsledky nepřesné, díky použitému LED zdroji. Spektrum LED zdroje nemá hladký průběh. Obsahuje zákmity (viz. obr. 5.14), díky nimž se hůře určuje maximum.



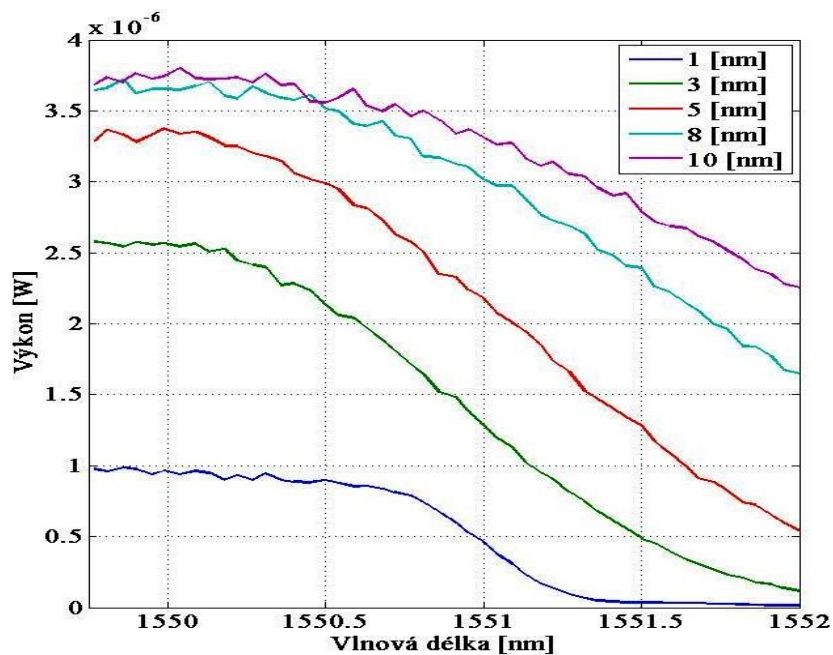
Obrázek 5.14: Odražené spektrum LED zdroje (Optisystem)

5.2.1 Vliv FWHM a odrazivosti na odražené výkonové spektrum

Abych zjistil nejideálnější tvar křivky, pro co nejpřesnější vyhodnocení teploty z odraženého výkonu, bylo třeba simulovat mnoho kombinací velikosti šířky spektra a odrazivosti (viz. Příloha A:). Parametr FWHM byl měněn v rozsahu 1 až 20 nm jak u měřicí tak u vyhodnocovací FBG. Odrazivost byla měněna v rozsahu 1 až 99,99 % u vyhodnocovací mřížky. Pro měřicí FBG jsem se rozhodl zachovat hodnotu odrazivosti po několika simulacích na 1 %. Pokud bych nastavil odrazivost např. na 50 % tak by nastala ztráta poloviny výkonu, který by putoval na druhou mřížku. V tomto případě by za druhou mřížku zůstala $\frac{1}{2}$ přeneseného výkonu z 50% což je už jen 25%. To by vedlo k tomu, že po několika málo mřížkách by klesl přenesený výkon až téměř na 0 W a nebylo by možné měřit výkon (teplotu) pro větší počet senzorů.

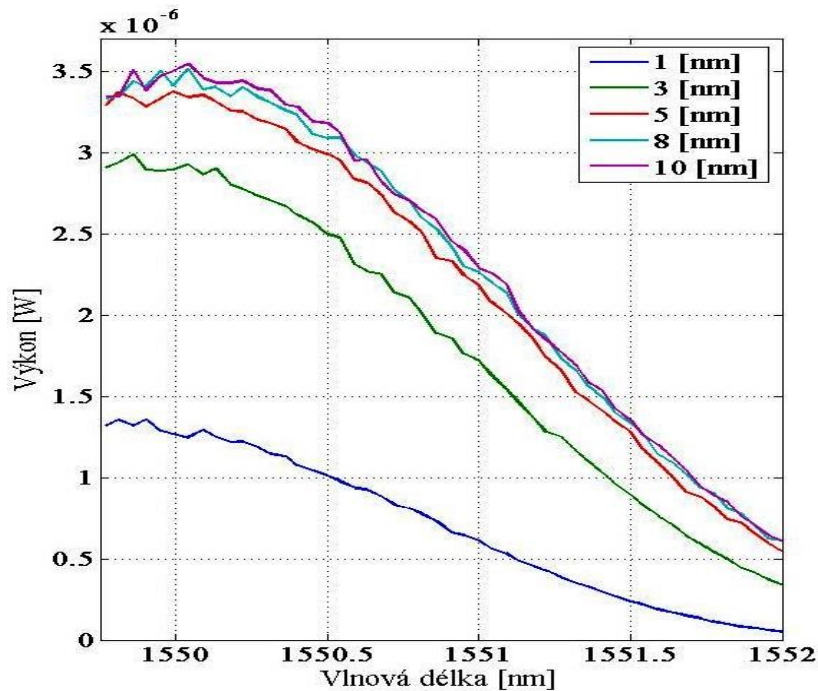
Simulováno bylo vždy 50 iterací v rozsahu -20°C až 200°C což odpovídalo vlnové délce 1549,76595 až 1552,3405 nm. Rozdělení hodnot v tomto rozsahu bylo použito lineární na 50 různých hodnot pomocí funkce Sweep. Tak jsem získal poměrně přesné výstupní hodnoty, vypovídající o tom jaký vliv má FWHM a odrazivost na tvar křivky odraženého výkonového spektra.

Každý z následujících grafů ukazuje změnu FWHM nebo odrazivosti u měřicí nebo vyhodnocovací Braggovské mřížky. Na obr. 5.15 je ukázka vybraných hodnot FWHM nastavených v subsystému, který simuluje měřicí FBG. Na grafu lze vidět, jak zvětšením šířky spektra roste odražený výkon. Je to způsobeno pozvolnější změnou překryvu ploch odražených spekter měřicí a vyhodnocovací mřížky. Tím dochází k pomalejšímu úbytku výkonu, protože posun spekter u širšího spektra není tak rapidní. Další kombinace nastavení FWHM jsou uvedeny v Příloha A:



Obrázek 5.15: *Spektrum odraženého signálu se změnou hodnot FWHM měřené FBG*

Hlavním ukazatelem, který jsem sledoval, byl tvar křivky. Cílem bylo dosáhnout co nejhladší křivky i v nelineární části. Jako nejvhodnější se mi jevila velikost FWHM = 5 nm. Křivka měla nejhladší průběh, jak v lineární části, tak i mimo něj a dostatečný výkon pro detekování. Pokles výkonu se zdál být nejvíce pozvolný.

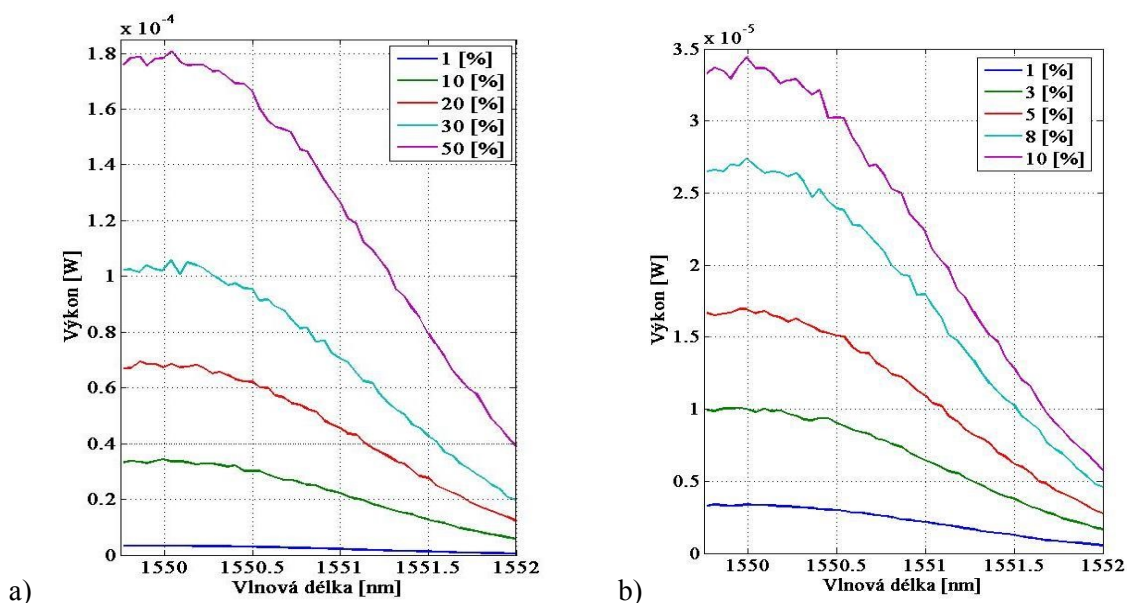


Obrázek 5.16: *Spektrum odraženého signálu se změnou hodnot FWHM vyhodnocovací FBG*

Druhým měřeným parametrem byla šířka spektra u vyhodnocovací mřížky. Na obr. 5.16 jsou zaznamenány hodnoty FWHM ve stejném rozmezí jak u předchozí simulace. Jako nejvhodnější jsem určil opět velikost FWHM = 5 nm. Toto nastavení mělo srovnatelný výkon s ostatními, šířkou spektra většími křivkami, ale mnohem hladším průběhem v celé části křivky odraženého spektra.

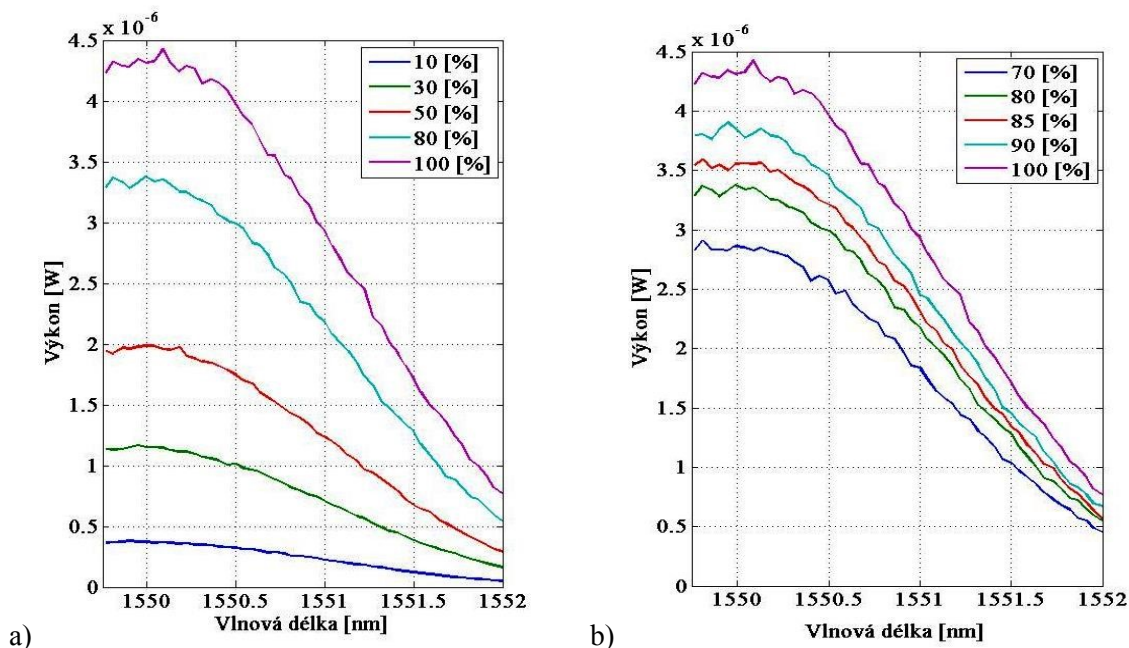
Provedl jsem různé kombinace šířky spektra pro obě mřížky a jako nejlepší jsem zvolil pro měřící i vyhodnocovací Braggovskou mřížku velikost FWHM na 5 nm.

V další simulaci jsem měnil velikost odrazivosti. Pro lepší přehlednost jsou zde dva obrázky zobrazující na obr. 5.15a) odrazivost v rozmezí 1 až 50 % z kterých lze vidět jaký vliv má odrazivost na velikost odraženého výkonu a tvar křivky. Při 1 % odrazivosti je přeneseno 99 % výkonu k dalším mřížkám a tak je odražený výkon malý, naopak pokud je odrazivost 50 % je polovina světelného výkonu z LED odražena od FBG a výkon roste. Jelikož jsem chtěl dostatek výkonu pro další senzory na trase, je lepší nastavit odrazivost maximálně v rozsahu zobrazeném na obr.5.17b) tedy do 10%.



Obrázek 5.17: Vliv změny odrazivosti u měřící FBG a) v rozsahu 1 až 50%
b) v rozsahu 1 až 10%

Protože jsem chtěl aby mohlo být na měřené trase co nejvíce senzorů, zvolil jsem odrazivost měřené FBG = 1%. Při této hodnotě lze teoreticky v podmínkách simulačního prostředí na jedné trase mít 99 senzorů. Pokud by byla odrazivost např. 50% počet senzorů na trase by mohl být maximálně do 10 senzorů a to už by byl výkon velmi nízký. Zůstalo by méně než 1% z celkového výkonu a odrazivost by musela být na vyhodnocovací mřížce nastavena na 100%, jinak by byl výkon ještě menší.



Obrázek 5.18: Vliv změny odrazivosti u vyhodnocovací FBG a) v rozsahu 10 až 100%
b) v rozsahu 70 až 100%

U vyhodnocovací FBG už nebylo třeba brát takový zřetel na přenesený výkon pro větší počet senzorů. Pokud bych chtěl získat maximální odražený výkon, musela by být odrazivost nastavena na 100 %, což je patrné i z obr. 5.18. Dal jsem přednost odrazivosti 80 % pro vyhodnocovací mřížku z důvodu tvaru křivky, která byla mnohem méně zdeformována v porovnání s křivkami s odrazivostí nad 80 % (obr. 5.16a)). Zároveň jsem požadoval přijatelný výkon, který se v celém měřeném spektru pohyboval v rozmezí přibližně od 0,5 do 3,5 μW . Pro detailnější představu průběhu odraženého spektra v rozsahu 1550 až 1552 nm s odrazivostí 70 až 100 % je zde zobrazen obr. 5.18b).

Po nasimulování všemožných kombinací FWHM a odrazivosti u měřící a vyhodnocovací mřížky popsanych výše jsem určil nejlepší nastavení obou těchto parametrů. Tyto parametry jsou uvedeny v tab. 5.2.

Tabulka 5.2: Výsledné nastavení parametrů FBG senzoru

	Měřená FBG	Vyhodnocovací FBG
FWHM [nm]	5	5
Odrazivost [%]	1	80

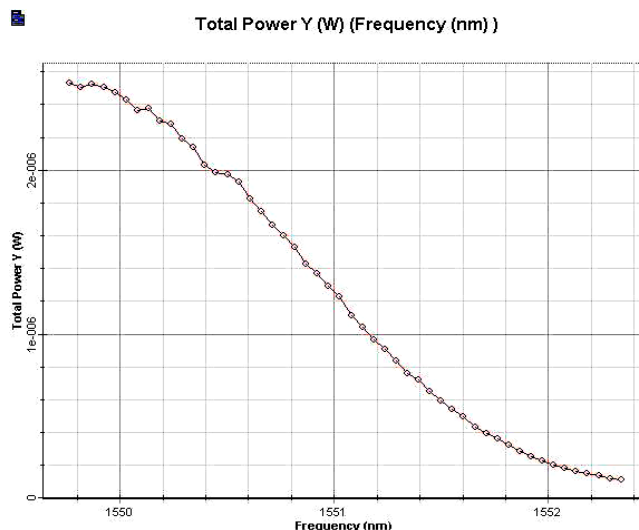
5.3 Návrh převodní charakteristiky

Ze zprůměrovaných dat 10 měření pomocí simulace bylo možné určit z naměřeného výkonu pro teplotní rozsah -20°C až 200°C nastavených na měřené FBG převodní charakteristiku. Pomocí ní lze vypočítat z jakéhokoliv výkonu v tomto rozsahu, který naměřím

na každém ze senzorů, jaké teplotě odpovídá. Převodní charakteristika byla získána z charakteristiky na obr. 5.20.

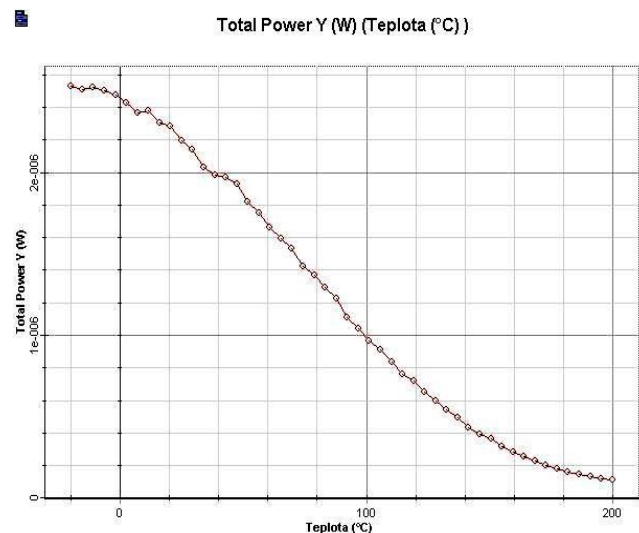
5.3.1 Kalibrace senzoru (rozsah -20°C až 200°C)

Pomocí regresní analýzy v programu Matlab jsem zvolil jednu s křivek popsanych matematickou funkcí podobající se naměřeným datům. Křivka s nejlineárnějším průběhem v majoritní části, získaná vhodným nastavením parametrů měřící a vyhodnocovací FBG mřížky dle tab. 5.1 v simulaci, je zobrazena na obr. 5.19 a na obr. 5.20.



Obrázek 5.19: *Závislost odraženého výkonu na vlnové délce (Optisystem)*

Grafy na obr. 5.19 a 5.20 vyjadřují měřené hodnoty odraženého výkonu. Dokazují, že zvolené vlnové délce odpovídá měřený rozsah teplot. Pomocí nich jsem si potvrdil správnost a funkčnost vyhodnocovacího systému popsaného v kapitole 5.1.4., kde se průběh křivky téměř shoduje s obr. 5.9.

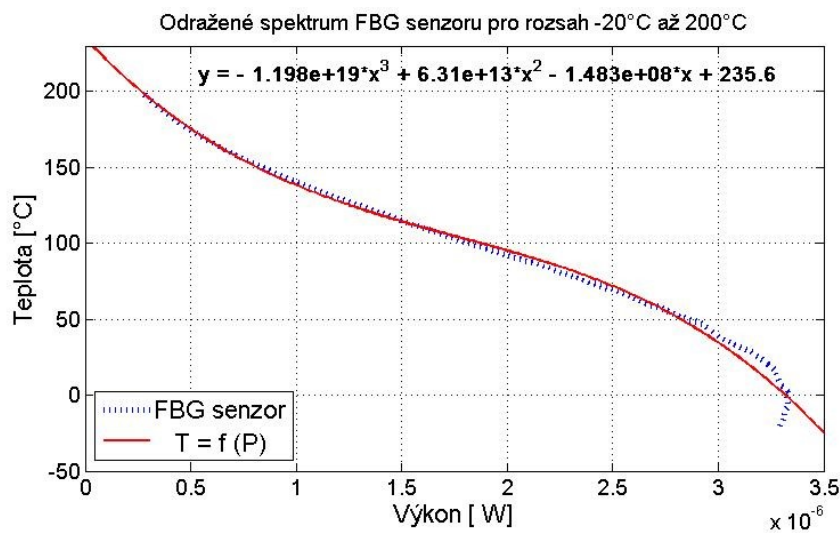


Obrázek 5.20: *Závislost odraženého výkonu na teplotě (Optisystem)*

Jelikož jsem chtěl získat z hodnot odraženého výkonu výpočtem teplotu, musel jsem křivku (obr. 5.19) otočit pro dopočet teploty. Data byla aproximována křivkou kubickou, která nejvíce korespondovala s naměřenými daty. Je popsána rovnicí 5.2.

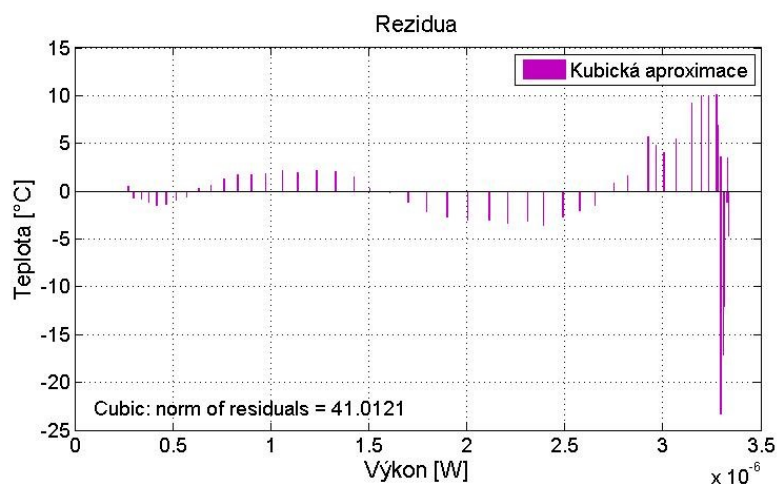
$$y = -1,198^{19}x^3 + 6,31^{13}x^2 - 1,483^8x + 235,6 \quad (5.2)$$

Modrá přerušovaná čára na grafu (obr. 5.21) ukazuje měřená data. Červená čára vykresluje závislost teploty na odraženém výkonu pomocí kubické křivky vystihující naměřená data.



Obrázek 5.21: Kalibrační křivka a rovnice

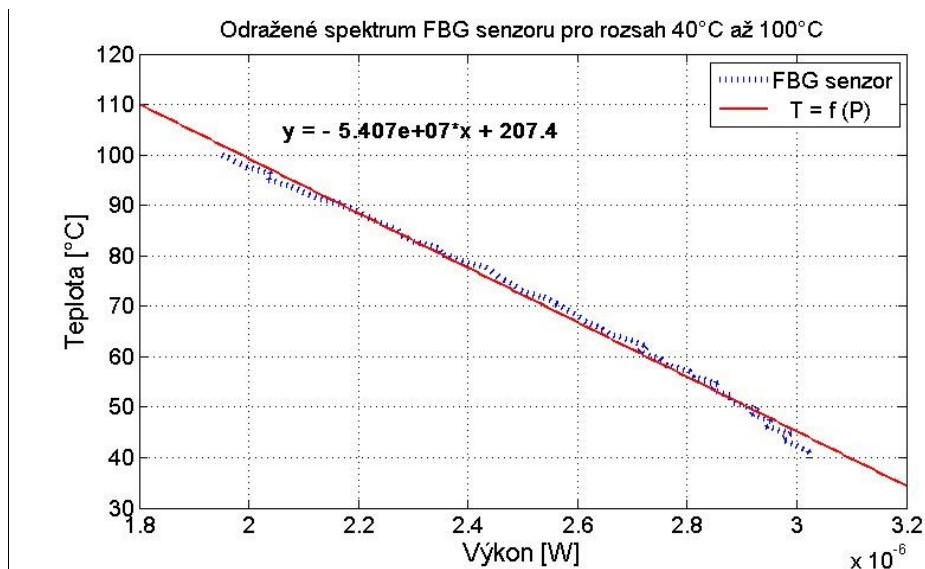
Do rovnice 5.2 za proměnnou x dosazují naměřený odražený výkon. Jako výsledek (proměnná y) dostanu teplotu na senzoru. Z důvodu nedokonalé shody aproximované a změřené křivky vznikly odchylky mezi simulovanou teplotou a vypočítanou teplotou ze vzorce 5.2. Největší nepřesnost je na okraji měřicího rozsahu. Tyto odchylky jsou zobrazeny na obr. 5.22.



Obrázek 5.22: Odchylka pro rozsah teplot od -20°C do 200°C

5.3.2 Kalibrace senzoru (rozsah 40°C až 100°C)

Druhá varianta senzoru lze použít v užším měřicím rozsahu s vyšší přesností měření. Z důvodu velkých odchylek v měřeném rozsahu teplot popsaných v kapitole 5.3.1 jsem se rozhodl přesnost vyhodnocování teploty matematickým výpočtem zlepšit snížením měřeného rozsahu. Odstranil jsem tak okrajové části křivky, které tvořily největší nepřesnost senzoru.

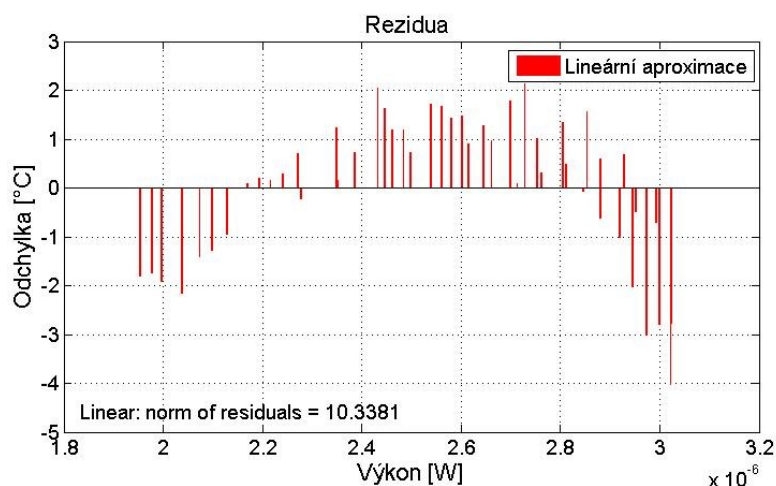


Obrázek 5.23: Kalibrační křivka a rovnice

Nová křivka byla pomocí regrese metody aproximována křivkou lineární (obr. 5.23). Rovnice pro výpočet teploty z odraženého výkonu vypadá takto:

$$y = -5,407^7 x + 207,4 \quad (5.3)$$

Maximální odchylka se výrazně zmenšila, nepřekročila +/- 4°C, viz. obr. 5.24.



Obrázek 5.24: Odchylka pro rozsah teplot od 40°C do 100°C

6 Návrh TDM části pro identifikaci FBG senzorů

Snímání teploty z více senzorů pomocí časového multiplexu jsem řešil konfigurací dvou přístrojů. Byly to generátor světelných pulzů a měřicí přístroj (Optical time domain visualizer). Měřicí přístroj měřil odražený výkon v čase. Pomocí časového zpoždovače (Delay) bylo možné rozlišit jednotlivé senzory na časové ose měřicího přístroje.

Důležitou podmínkou u nastavení šířky pulzu generátorem bylo: délka trvání pulzu musí být kratší, než dvojnásobek doby potřebné k přenosu světla mezi dvěma FBG senzory. To jsem docílil nastavením šířky pulzu na 8 ns a zpoždovačem nastaveným na 20 ns. Získal jsem tak více jak dvojnásobný prostor pro zobrazení každého spektra všech senzorů na trase v časové ose. V prostředí optisystemu jsem simuloval čas přenosu světla vláknem pomocí zpoždovače. V reálných podmínkách by stačilo samotné optické vlákno z Braggovskými mřížkami. Vzdálenost mezi nimi by byla dle požadavků v daném místě a tomu by se přizpůsobila délka pulzu nastavená generátorem. Vztah pro výpočet průchodu světla optickým vláknem je v rovnici 6.1 a 6.2.

$$v = \frac{c}{n} \quad , \quad (6.1)$$

kde n je index lomu jádra, c je rychlost světla ve vakuu a v značí rychlost světla ve vlákně.

$$t = \frac{L}{v} \quad , \quad (6.2)$$

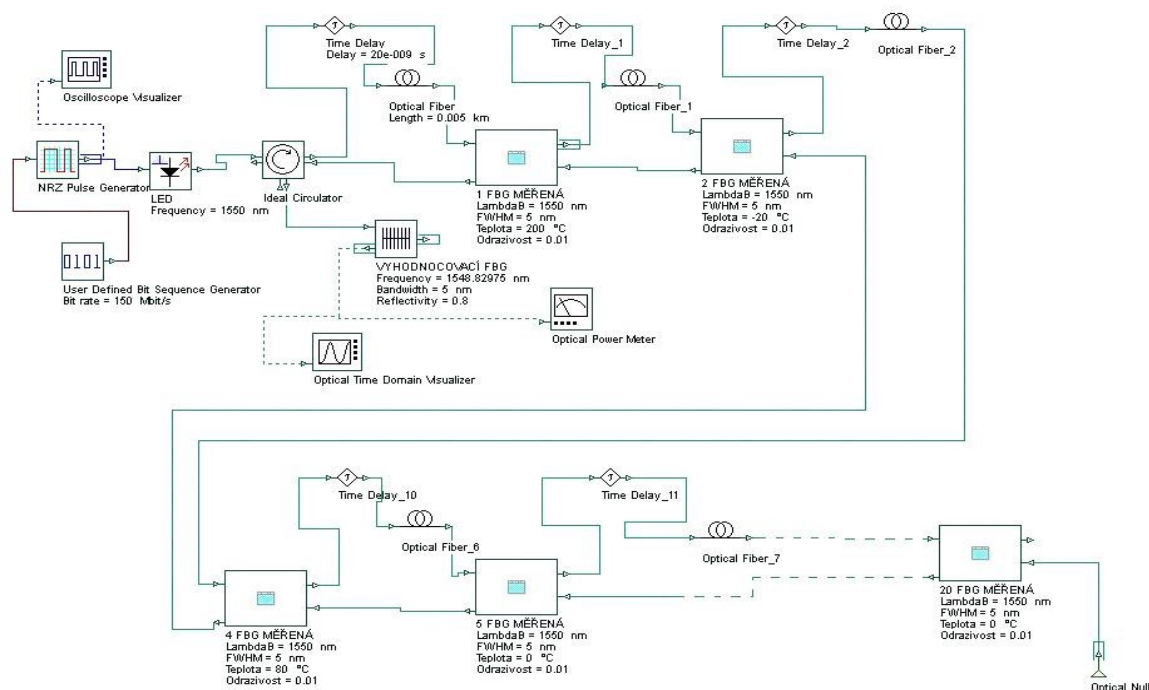
kde t je čas průchodu světla daným prostředím, L je délka optického vlákna (rozestup mezi FBG senzory)

Pokud by tato podmínka nebyla splněna, jednotlivá spektra pulzů z LED zdroje odražených od FBG mřížky v senzoru by se překrývala a nebylo by možné odečítat výkon na každém senzoru zvlášť, tím pádem ani určit měřenou teplotu.

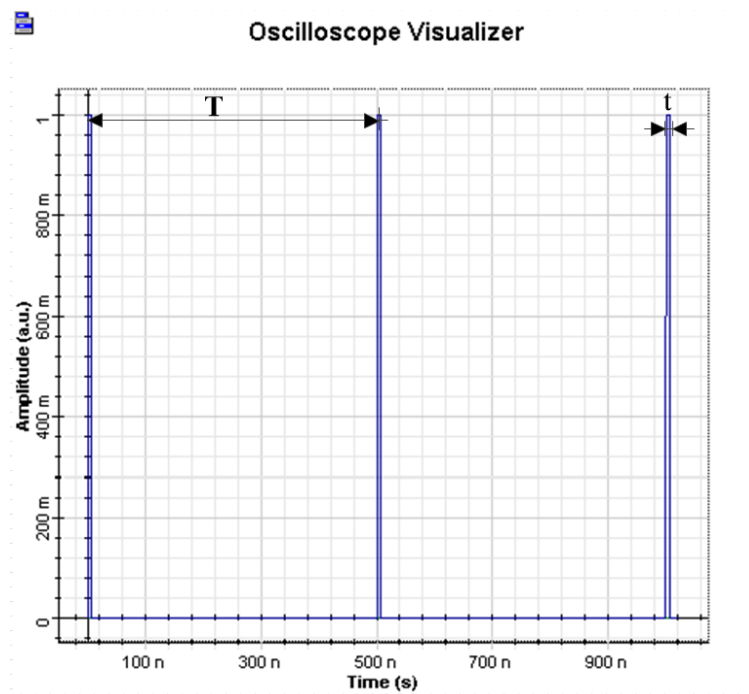
6.1 Schéma zapojení a nastavení parametrů

Zapojení je složeno ze sériového řazení FBG senzorů vzdálených od sebe v předem definované vzdálenosti (obr. 6.1). Na vyhodnocovací mřížku je připojen měřicí přístroj pro měření výkonu odraženého od každé z Braggovských mřížek posunutých v čase na měřené trase. Rozestup mezi senzory a jejich počet lze měnit. Vliv na počet senzorů má nastavená odrazivost u každé z mřížek. Rozestup senzorů mezi sebou a tím i celková délka trasy, kterou lze snímat, záleží kromě LED zdroje i na nastavení generátoru, který vysílá pulzy v určitých intervalech tak, aby se část pulzu vracejícího se z mřížek nepřekrýval. Generátor musí mít nastavenou délku pulzu (obr. 6.2), střidu odpovídající počtu použitých senzorů a vzdálenosti mezi nimi, tak aby se do časové periody vlezly všechny senzory a přitom se nepřekrýly po vyslání dalšího pulzu. Jak často bude změna teploty detekována, záleží na kompromisu mezi

počtem senzorů, s čímž souvisí větší délky pulzu pro jejich oddělení, a rychlostí kontinuálního čtení měřené teploty. [20]



Obrázek 6.1: Schéma zapojení pole 20 FBG mřížek (Optisystem)



Obrázek 6.2: Zobrazení výstupu (délky pulzu a periody) z generátoru (Optisystem)

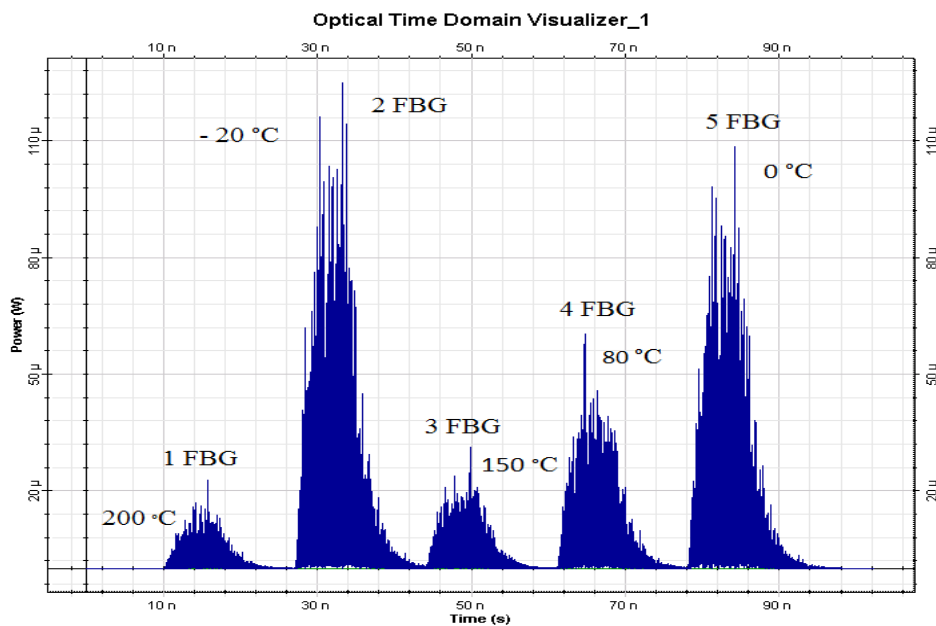
Parametry generátoru splňující výše popsané podmínky pro správné čtení teploty (výkonu) pro 20 senzorů jsou ukázány v tab. 6.2.

Tabulka 6.1: *Nastavení generátoru a zpoždovače*

Přenosová rychlost [Mbit/s]	150
Délka pulzu (t) [ns]	8
Délka periody (T) [ns]	500
Střída [%]	1,8
Zpoždovač [ns]	20

6.2 Identifikace FBG senzoru s využitím časového multiplexu

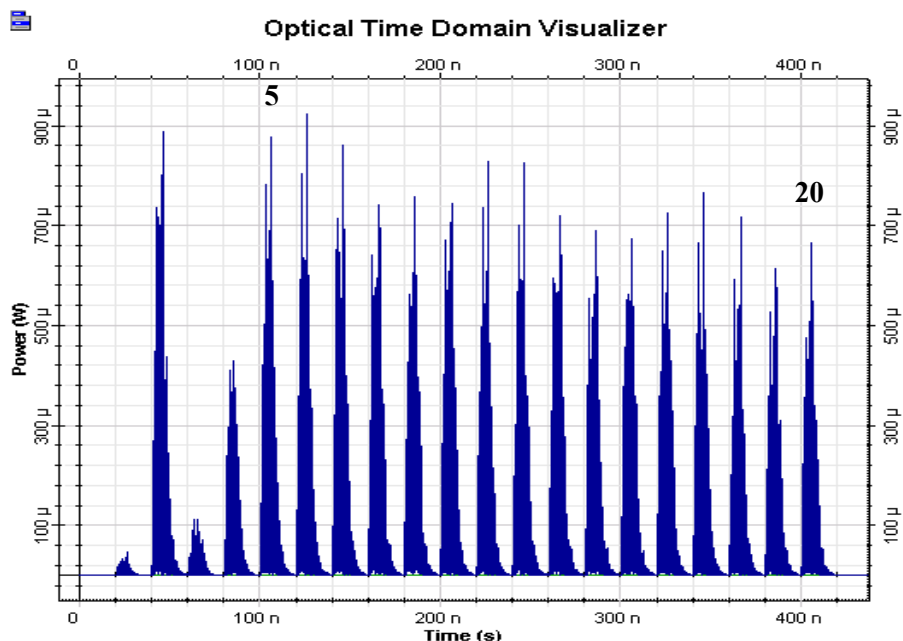
FBG senzory jsou v této simulaci od sebe vzdáleny přibližně 5 m. Na každém je nastavena jiná teplota z rozsahu od -20°C až do 200°C . Pro lepší názornost jak velikost teploty ovlivňuje odražený výkon, který je poté možné vyhodnotit, je vidět z obr. 6.3. Jednotlivá spektra se nepřekrývají a je možné jasně určit, které spektrum patří jakému senzoru na trase. Problém je ve tvaru samotného odraženého spektra z LED zdroje, kde se velmi těžko přesně určuje výkon dané mřížky (viz. kapitola 6.3).



Obrázek 6.3: *Ukázka 5 FBG senzorů oddělených v čase*

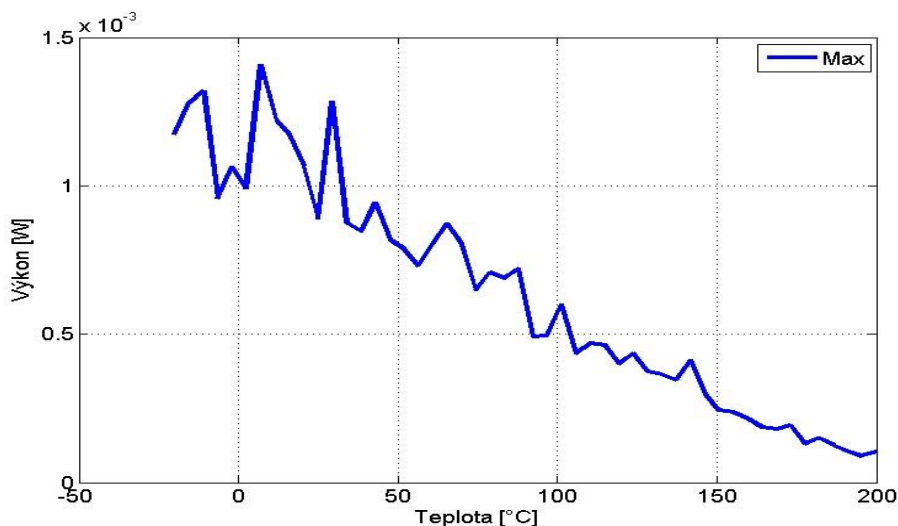
Více senzorů na jednom vlákně ukazuje obr. 6.4, kde prvních pět peaků odpovídá obr. 6.3 a k nim je připojeno dalších 15 senzorů jako ukázka, že lze nasimulovat větší počet senzorů. Počet senzorů by mohl být ještě větší, vše záleží na požadavcích v daném místě použití a nastavení senzoru. Na obr. 6.4 jsou senzory 5 až 20 nastaveny všechny na 0°C abych ukázal,

že všechny mají přibližně stejnou velikost odraženého výkonu. Z obr. 6.4 to však není až tak patrné, z důvodu použití LED zdroje.

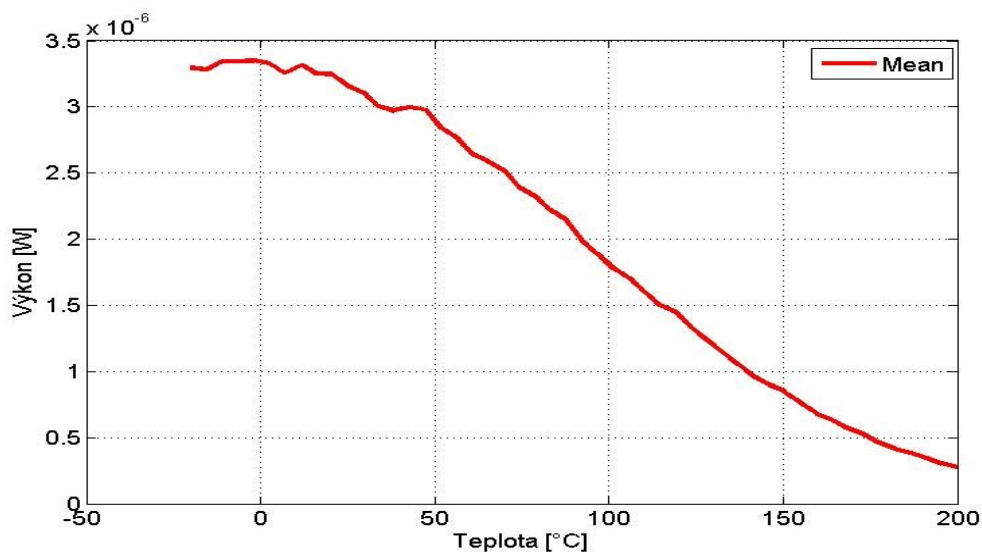


Obrázek 6.4: Ukázka 20 FBG senzorů oddělených v čase

Díky použité LED diodě, jako zdroj světelných pulzů, nebylo možné měřit maximální odražený výkon (Power max) od senzorů. Tyto hodnoty značně kolísají, což je vidět na obr. 6.5 a nemají tedy tolik vypovídajícího hodnotu. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl měřit střední odražený výkon (Power mean). Tvar křivky (obr. 6.6) vygenerovaný z hodnot středního odraženého výkonu lépe vystihuje očekávaný výstup senzoru. Mnohem více se tak podobá křivce na obr. 5.9, která popisuje ideální tvar spektra odraženého výkonu FBG mřížky.



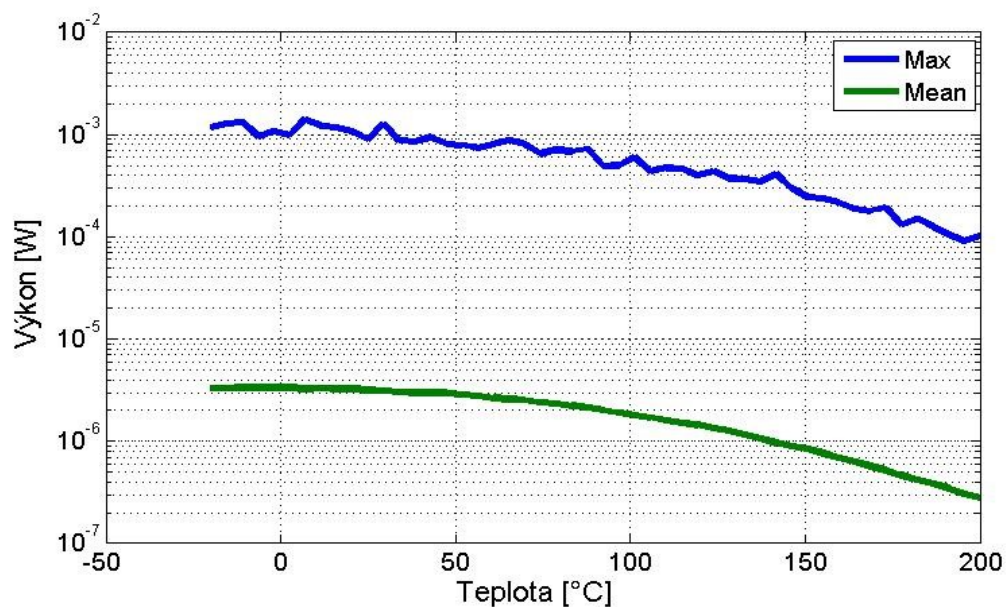
Obrázek 6.5: Maximální (Max) odražený výkon FBG senzoru



Obrázek 6.6: Středního (Mean) odraženého výkonu FBG senzoru

Vzájemné porovnání křivky měřící maximální a střední velikost odraženého výkonu je znázorněna na obr. 6.7. Naměřené hodnoty maximálního vs. středního odraženého výkonu se liší téměř o 3. řády.

Optický měřič časové oblasti, pomocí něhož odečítám odražený výkon, zobrazuje celé spektrum. Proto se spektra na obr. 6.3 a 6.4 velmi liší od střední hodnoty, kterou vyhodnocuji.



Obrázek 6.7: Porovnání poklesu výkonu při čtení hodnot z měřicího přístroje

Závěrečné stanovení parametrů senzoru obsahuje tab. 6.2.

Tabulka 6.2: *Parametry FBG senzoru teploty*

	Senzor teploty	
	1. varianta	2. varianta
Měřicí rozsah [°C]	-20 až 200	40 až 100
Citlivost [nW/°C]	13,7	17,8
Přesnost [°C]	+/- 24	+/- 4
Braggovská vlnová délka [nm]	1550	

Přesnost jsem určil z maximální odchylky, která je vidět na obr. 5.22 a 5.24 zaokrouhlenou směrem nahoru. Měřicí rozsah byl zvolen ve variantě 1 co nejširší a ve variantě 2 tak, aby vzrostla přesnost senzoru a zároveň se příliš nezúžil měřicí rozsah. Citlivost byla vyhodnocena jako velikost odraženého výkonu při změně o 1°C. Ukázka výpočtu citlivosti pro senzor (varianta 1) je v rovnici 6.3

$$C = \frac{\Delta P}{\text{Měřicí rozsah}} = \frac{3,29481e^{-6} - 2,728971e^{-7}}{220} = 13,736 \text{ [nW/°C]} \quad (6.3)$$

Závěr

Měření teploty je nezbytnou součástí v mnoha aspektech našeho života. V dnešní době technických vymožeností jde pokrok dopředu nejen ve vzniku nových technologií a výrobních procesů, ale i ve vývoji nejrůznějších senzorů. Pomocí senzorů využívajících optické vlákno lze měřit ve mnoha odvětvích laické i odborné veřejnosti. Typ senzoru, kterému jsem se věnoval v této práci lze aplikovat tam, kde to jiné systémy neumožňují. Především díky monitorovacímu zařízení, které není součástí senzoru, tak lze použít v nepřístupných prostorech. Dalšími výhodami jsou velká odolnost v nepříznivých podmínkách, teplotní rozlišení, způsob vyhodnocování měřené veličiny a spousta dalších aspektů, díky kterým se stávají senzory s Braggovskými mřížkami stále více žádanými. Lze je použít pro monitorování teploty v tunelech, produktovodech, podzemních šachtách, přehradách, ale např. i ve zdravotnictví a pro laboratorní účely.

Diplomová práce se věnovala návrhu a simulaci kvazi-distribuo­vaného senzoru teploty. Veškeré návrhy a simulace měření probíhaly v prostředí komerčního programu Optisystem 13 společnosti Optiwave. Navrhl jsem dva typy senzoru teploty s rozdílným měřicím teplotním rozsahem, přesností a citlivostí. Práci jsem strukturoval do několika částí. V první části jsem se věnoval širšímu náhledu do problematiky a popisoval zde co je optický senzor, jeho dělení do kategorií dle mnoha hledisek jako jsou způsob využití nebo rozdělení dle prostorového rozložení měřené veličiny. Také zde zmiňuji funkční princip optického senzoru aplikovaného ve vláknech. Jelikož jde o senzory z Braggovskou mřížkou, byla další kapitola věnována Braggovským mřížkám. Zde jsem popisoval, jak se používá FBG mřížka v senzorové technice, vyzdvihuji její vlastnosti, které jsou u jejich hlavního využití (v telekomunikační technice) spíše na obtíž a snažíme se je potlačit. V kapitole jsou také vysvětleny základní parametry mřížky, dělení mřížek a jejich výrobní technologie. Pro návrh senzoru je třeba znát několik závislostí pro měření teploty. Tomu se věnuje třetí kapitola, kde jsou také zahrnuty vyšetřovací techniky pro převod posunu vlnové délky na jinou snadněji měřitelnou veličinu. V poslední teoretické části jsem se zabýval metodou, pomocí níž je možné řadit na jedno vlákno více FBG senzorů a dosáhnout tak např. kvazi-distribuo­vaného měření teploty, což je mým úkolem v praktické části této práce. Metody multiplexování, pomocí nichž je to možné, je několik. Hlavní dvě nejčastěji využívané metody multiplexování (WDM a TDM) jsou vysvětleny v šesté kapitole.

Hlavní část praktické práce tvoří návrh FBG senzoru teploty. První věcí, kterou jsem se zabýval, bylo jak vyřešit zapojení FBG mřížek pro vznik části senzoru ovlivněnou teplotou v Optisystemu. Chtěl jsem, aby bylo zapojení co nejvíce podobné reálné aplikaci. Z tohoto důvodu vznikl subsystém, jehož hlavní předností je úspora použitých FBG mřížek a snadné nastavení parametrů, které jsem poté vyhodnocoval. Subsystém obsahuje parametry a konstanty pro výpočet posunu vlnové délky vlivem změny teploty a deformace.

Způsob vyhodnocování posunu vlnové délky jsem se rozhodl udělat pomocí další FBG mřížky (vyhodnocovací), která měla pevně danou Braggovskou vlnovou délku a nebyla ovlivněna teplotou. Bylo tak možné porovnat výkonové spektra mřížky ovlivněné teplotou

(měřicí) s mřížkou vyhodnocovací. Měřil jsem odražený výkon od měřicí mřížky, který byl naveden na mřížku vyhodnocovací. Průnik výkonových spekter posunuté mřížky vlivem změny teploty a mřížky vyhodnocovací mi dal výsledný výkon použitý pro detekování teploty. Více o způsobu vyhodnocování je popsáno v kapitole 5.1.4.

Dalším mým úkolem bylo nastavit šířku spektra a odrazivost Braggovské mřížky tak, abych získal odražené výkonové spektrum co nejlineárnější v majoritní části křivky a co nejhladší na okrajích. Tohoto nastavení jsem po mnoha simulacích nejrozdílnějšího nastavování docílil nastavením šířky spektra měřicí i vyhodnocovací mřížky na 5 nm. Odrazivost jsem jako nejvhodnější u vyhodnocovací mřížky zvolil na 80% u měřicí na 1% z důvodu potřeby ponechat většinu světelného výkonu z širokopásmového LED zdroje pro další senzory na trase a maximalizovat tak jejich počet. Získal jsem křivku zobrazující závislost teploty na odraženém výkonu, blíží se ideálnímu tvaru křivky. Poté jsem navrhnul převodní charakteristiku pro výpočet teploty z odraženého výkonu, čemuž je věnována kapitola 5.3. Měřicí teplotní rozsah jsem zvolil v rozmezí -20 až 200°C, což jsem považoval za dostatečný rozsah pro většinu aplikací, kde se senzor v reálných podmínkách využívá. Jelikož se projevila značná odchylka simulované a vypočítané teploty vzrostla nepřesnost senzoru. Proto jsem měřicí rozsah zmenšil na 40 až 100°C a vznikla tak varianta 2 teplotního senzoru. Pro ni jsem využil jen lineární část křivky. Touto změnou se přesnost senzoru zlepšila a výsledná přesnost je $\pm 4^\circ\text{C}$. Také se zvýšila citlivost senzoru na hodnotu 17,8 nW/°C.

Posledním bodem praktické části bylo sériové zapojení pole senzorů, pro jehož identifikaci jsem využil metodu časového multiplexování. Za vyhodnocovací mřížku jsem tak připojil optický časový vizualizer, který zaznamenával odražený výkon v čase. Jednotlivé senzory jsem v simulaci od sebe odlišil pomocí časového zpožděvače tak, aby se jednotlivá výkonová spektra každé z mřížek nepřekrývala. K tomu bylo třeba splnit několik dalších podmínek a vhodně nastavit generátor pulzů. Tuto problematiku jsem popsal v kapitole 6.1. V simulaci jsem vytvořil pole 20 senzorů, na kterých lze měřit teplotu. Šlo o kvazi-distribuované měření s rozestupy senzorů mezi sebou přibližně po 5 m. Problém nastal při určování odraženého výkonu pomocí časového vizualizeru. Tento přístroj nedokáže měřit hodnotu v určitých časových intervalech a je tak nemožné získat hodnotu z každého senzoru jednotlivě. V Optisystemu bohužel neexistuje způsob jak oddělit v čase jednotlivé senzory. Řešením v reálných podmínkách by byl např. časový filtr, který by dokázal vyfiltrovat vždy jen určitou část na časové ose odpovídající výkonovému spektru daného senzoru. Pak by bylo možné určit odražený výkon na každém ze senzorů a detekovat teplotu.

Cílem této práce bylo především zjistit vhodné nastavení šířky spektra a odrazivosti pro navržení teplotního senzoru využívající Braggovské mřížky, což bylo důkladně prozkoumáno.

Použitá literatura

- [1] **YIN, Shizhuo, Paul B RUFFIN a Francis T YU.** Fiber optic sensors. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, c2008, xiii, 477 p. Optical science and engineering (Boca Raton, Fla.), 132. ISBN 14-200-5365-5.
- [2] **FANG, Zujie.** Fundamentals of optical fiber sensors. Hoboken, N.J.: Wiley, c2012, xiii, 476 p. ISBN 978-047-0575-406.
- [3] **OTHONOS, Andreas a Kyriacos KALLI.** Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing. Boston, Mass.: Artech House, c1999, xiv, 422 p. ISBN 08-900-6344-3.
- [4] **KROHN, D.** Fiber optic sensors: fundamentals and applications. Research Triangle Park, NC: Instrument Society of America, c1988, 239 p. ISBN 08-766-4997-5.
- [5] **Šiška, Petr a kolektiv:** Nekomunikační Aplikace Optických Vlákén, studijní podklady předmětu, 99 str.
- [6] **HELÁN, Radek.** Modelování a optimalizace komplexních vláknových difrakčních struktur [online]. V Brně: Vysoké učení technické, 2009 [cit. 2014-12-14]. 30 s. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/892/dizertace.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. FRANTIŠEK URBAN, CSc.
- [7] **URBAN, František.** Měřicí pracoviště pro analýzu vlastností vláknových mřížek [online]. Brno, 2012 [cit. 2014-12-17]. 54 l. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=57318. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce prof. Ing. MILOSLAV FILKA, CSc.
- [8] **DVOŘÁK, Milan.** Optické senzory. *Informační a vzdělávací centrum, kompozitních technologií* [online]. [cit.2015-03-02]. Dostupné z: http://www.kompozity.info/clanky/optik_ten/opticke_senzory.pdf
- [9] **SITI HABSAH BINTI** Investigation of fiber bragg grating sensor efficiency for temperature measurement [online]. Malaysia, 2012 [cit. 2015-03-02]. Dostupné z: http://portal.fke.utm.my/fklibrary/files/sitihabsahbintiibrahim/2012/18_SITIHABSAHBINTIIBRAHIM2012.pdf. Bachelor theses. Universiti Teknologi Malaysia. Vedoucí práce Dr. David Ian Forsyth.
- [10] **DAI, Yongbo, Yanju LIU, Jinsong LENG, Gang DENG a Anand ASUNDI.** A novel time-division multiplexing fiber Bragg grating sensor interrogator for structural health monitoring. Optics and Lasers in Engineering [online]. 2009, vol. 47, issue 10, s. 1028-1033 [cit. 2015-03-05]. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2009.05.012. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143816609001250>

- [11] **UDD, Eric a William B SPILLMAN.** *Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists*. 2nd ed. Hoboken: Wiley, c2011, xiii, 498 s. ISBN 978-0-470-12684-4.
- [12] Optical fibre sensors: principles and state of the art. In: Ofseth [online]. 2007 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: http://www.ofseth.org/IMG/pdf/OFSETH_D1_2_Annex1.pdf
- [13] **DOYLE, Crispin.** Fibre Bragg Grating Sensors An Introduction to Bragg gratings and interrogation techniques. *Smart Fibres* [online]. UK, 2003 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://smartfibres.com/Attachments/Smart%20Fibres%20Technology%20Introduction.pdf>
- [14] **FAJKUS, Marcel, Andrej LINER a Martin PÁPEŠ.** FBG senzor teploty se dvěma braggovskými mřížkami se vzájemně překrývajícími spektry. *Optoelektronika v telekomunikacích a senzorce* [online]. Ostrava, 2015 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: http://opte.imatte.cz/files/FBG_senzor_teploty_se_dvema_braggovskymi_mrizkami.pdf
- [15] **Weis, R. S., A. D. Kersey, a T. A. Berkoff,** "A four-element fiber grating sensor array with phasesensitive detection," *IEEE Photonics technology Letters*, Vol.6, 1994, pp. 1469-1472.
- [16] **JONGHUN, Lee.** Characteristics of Fiber Bragg Grating Temperature Sensor using Thermal Strain of an External Tube. *Journal of the Korean Physical Society* [online]. 2011, vol. 59, issue. 5 [cit. 2015-05-04]. DOI: 10.3938/jkps.59.3188. Dostupné z: http://www.kps.or.kr/jkps/abstract_view.asp?articleid=034E22C7-4540-4403-9A82-14B14800D969
- [17] **Berkoff, T.A., a A.D. Kersey,** "Eight element time-division multiplexed fiber grating sensor array with integrated-optic wavelength discriminator," Second European Conference on Smart Structures and Materials, Glasgow, Scotland, 1994, Session 10, pp. 350-353.
- [18] Security in bluetooth, cdma and umts. In: *Upload, Share, and Discover Content on SlideShare* [online]. 2015 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: http://www.slideshare.net/ankit_gupta2109/security-in-bluetooth-cdma-and-umts
- [19] Katalogový list: Temperature Sensor FBGT-01. [online], Safibra, 2015
Dostupné z: http://www.safibra.cz/download.php?group=stranky3_soubory&id=201
- [20] Optiwave. OptiSystem Lite 1.0 : Technical Descriptions [online]. 2015. Dostupné z: <https://dSPACE.ist.utl.pt/bitstream/2295/42444/1/OptiSystem%20Lite%201.pdf>

Seznam příloh

Příloha A: Závislost FWHM a odrazivosti na odražené spektrum senzoru I

Součástí DP je DVD.

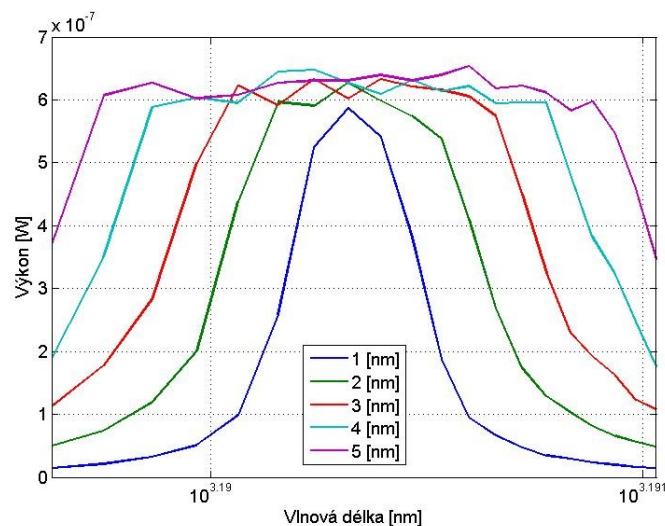
Adresářová struktura přiloženého DVD:

Adresář	Popis
/Dokument	Text diplomové práce ve formátu PDF/A
/Optisystem	Vytvořené simulace v Optisystemu

Příloha A: Závislost FWHM na odražené výkonové spektrum senzoru

Tabulka A.1: Nastavené parametry FGB mřížek

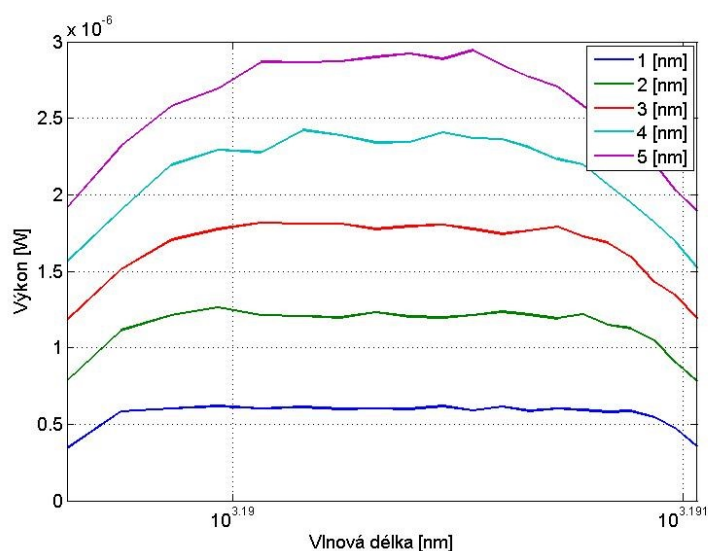
Měřená FBG		Vyhodnocovací FBG		
FWHM	Odrazivost		FWHM	Odrazivost
1 nm	0.01		1 až 5 nm	0.9999999



Obrázek A.1: Vliv změny FWHM u vyhodnocovací FBG v rozmezí 1 až 5 nm

Tabulka A.2: Nastavené parametry FBG mřížek

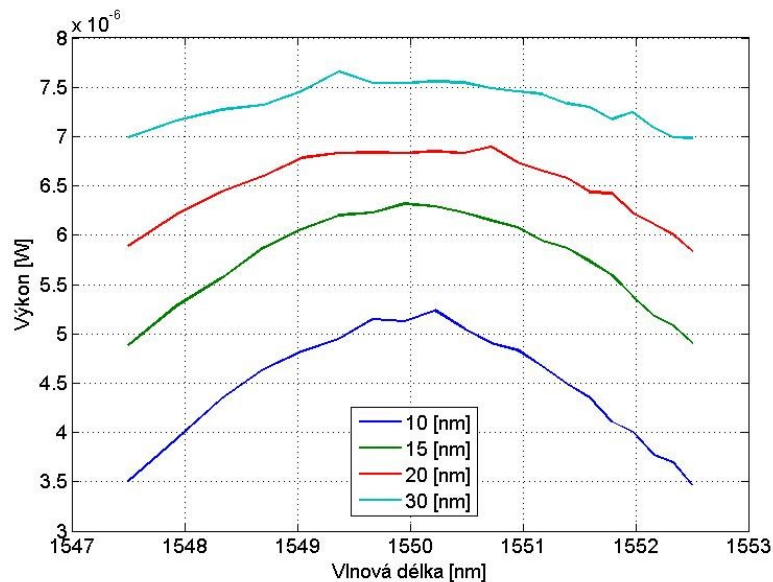
FWHM	Odrazivost		FWHM	Odrazivost
1 až 5 nm	0.01		5 nm	0.9999999



Obrázek A.2: Vliv změny FWHM u měřící FBG v rozmezí 1 až 5 nm

Tabulka A.3: *Nastavené parametry FBG mřížek*

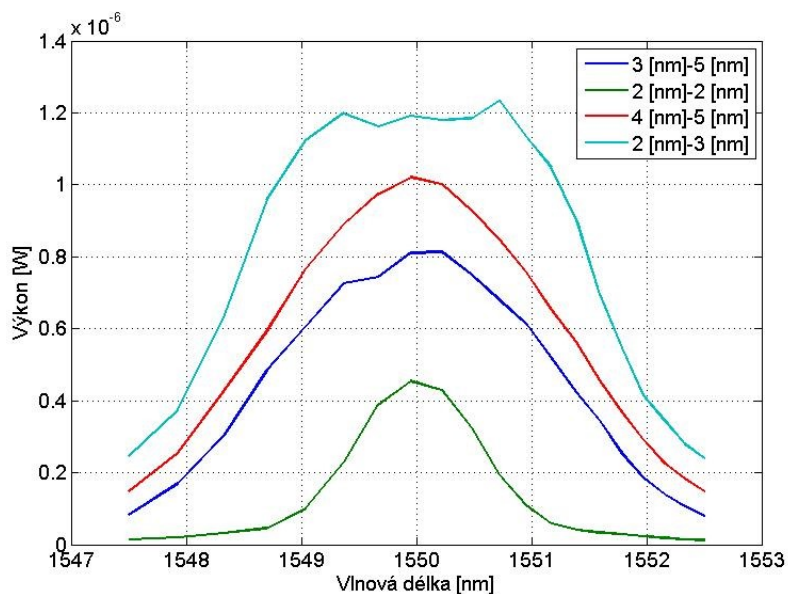
FWHM	Odrazivost		FWHM	Odrazivost
10 až 30 nm	0.01		5 nm	0.9999999



Obrázek A.3: *Vliv změny FWHM u měřící FBG v rozmezí 10 až 30 nm*

Tabulka A.4: *Nastavené parametry FBG mřížek*

FWHM	Odrazivost		FWHM	Odrazivost
3;2;4;2 nm	0.01		5;2;5;3 nm	0.9999999



Obrázek A.4: *Vliv změny FWHM u měřící i vyhodnocovací FBG*